



Caractérisation de polluants atmosphériques à haute résolution spatiale par télédétection optique

R. Idoughi

► To cite this version:

R. Idoughi. Caractérisation de polluants atmosphériques à haute résolution spatiale par télédétection optique. Optique / photonique. INSTITUT SUPERIEUR DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE (ISAE), 2015. Français. NNT: . tel-01235638

HAL Id: tel-01235638

<https://hal.science/tel-01235638>

Submitted on 30 Nov 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE)*

Présentée et soutenue le 15 septembre 2015 par :

RAMZI IDOUGHI

**Caractérisation de polluants atmosphériques à haute résolution spatiale
par télédétection optique.**

JURY

GRÉGOIRE MERCIER
CATHY QUANTIN
FRANÇOIS-MARIE BRÉON
XAVIER BRIOTTET
PIERRE-YVES FOUCHER

Lab-STICC
CNRS/ENS Lyon
CEA/DSM/LSCE
ONERA
ONERA

Président du Jury
Rapporteuse
Rapporteur
Directeur de thèse
Co-encadrant

École doctorale et spécialité :

GEET : Photonique et Systèmes Optoélectroniques

Unité de Recherche :

Office National des Études et Recherches Aérospatiales (ONERA)

Directeur(s) de Thèse :

Xavier BRIOTTET (ONERA) et Pierre-Yves FOUCHER (ONERA)

Rapporteurs :

Cathy Quantin (CNRS/ENS Lyon) et François-Marie Bréon (CEA/DSM/LSCE)

You will learn by reading but you will understand with LOVE.

Shams Tabrizi - Mystique persan du XIIIe siècle

L'attente est pareille à des ailes. Plus les ailes sont fortes, plus le vol est long.

Djalal al-dîn Rûmi - Mystique persan du XIIIe siècle

Table des matières

Résumé	vii
Abstract	ix
Remerciements	xi
Sigles et acronymes	xvii
Introduction	1
1 Caractéristiques des panaches anthropiques	7
1.1 Introduction	7
1.2 Composition physico-chimique des panaches anthropiques	8
1.2.1 Inventaire des polluants d'intérêt	8
1.2.2 Réglementation régissant les émissions des sources industrielles	10
1.2.3 Concentration de polluants à la sortie de cheminées pour différentes industries	11
1.2.4 Cas de la pollution due à des catastrophes industrielles	15
1.3 Comportement radiatif des panaches anthropiques	16
1.3.1 Généralités	16
1.3.2 Transfert radiatif : formalisme et notations	17
1.3.3 Signature des gaz d'intérêt en infrarouge thermique	22
1.3.4 Impact radiatif d'un panache industriel : mise en équation	24
1.4 Conclusion	26
2 Synthèse d'images hyperspectrales de scènes industrielles	29
2.1 Introduction	29
2.2 Outils pour la modélisation de scènes industrielles	32
2.2.1 Utilisation des bases de données de matériaux pour la modélisation du sol . .	32
2.2.2 Prise en compte de l'atmosphère sans panache	36
2.2.3 Modélisation de la dispersion des panaches industriels de gaz	36
2.2.4 Outil pour l'introduction du panache de gaz	42
2.2.5 Présentation des outils de transfert radiatif : performances et comparaison . .	45
2.3 Description du simulateur d'images hyperspectrales de scènes industrielles	54
2.3.1 Prise en compte du fond de la scène	55
2.3.2 Intégration du panache	56
2.3.3 Prise en compte des bruits de mesure	61
2.4 Description des scènes industrielles typiques	63
2.4.1 Raffinerie Jean Gaulin au Québec	63
2.4.2 Cimentrie de Boussens : <i>Scénario 2a (tab. 2.9)</i>	65
2.4.3 Incinérateur municipal de Toulouse : <i>Scénario 3 (tab. 2.10)</i>	67

2.4.4	Cas d'un accident : incendie d'une cimenterie : <i>Scénario 2b (tab. 2.11)</i> . . .	68
2.5	Résultats et discussions	69
2.5.1	Atmosphère sans panache	69
2.5.2	Atmosphère en présence de panache	71
2.5.3	Génération des scènes synthétiques	74
2.6	Conclusion	78
3	Caractérisation des panaches industriels par imagerie hyperspectrale	81
3.1	Introduction	81
3.2	Méthodes de détection de panaches par imagerie hyperspectrale	82
3.2.1	Introduction	82
3.2.2	Présentation des différentes méthodes	83
3.2.3	Application à des données réelles	87
3.2.4	Comparaison des résultats	94
3.3	Outils et traitements préliminaires à la quantification de panache par imagerie hyper- spectrale	96
3.3.1	Introduction	96
3.3.2	Caractérisation du fond atmosphérique : correction atmosphérique	97
3.3.3	Caractérisation des propriétés de surfaces	99
3.3.4	Conclusion	101
3.4	Méthodes de quantification de panache par imagerie hyperspectrale	102
3.4.1	Introduction	102
3.4.2	Approche linéaire	102
3.4.3	Approche non-linéaire	107
3.4.4	Comparaison et limitations des différentes méthodes	112
3.5	Conclusion	121
4	Estimation des concentrations de gaz dans un panache industriel : Méthode CONLIE	123
4.1	Introduction	123
4.2	Principe de la méthode	124
4.2.1	Démarche globale	124
4.2.2	Détection du panache	124
4.2.3	Classification	125
4.2.4	Estimation de la luminance de fond (sans panache)	127
4.2.5	Estimation des paramètres de l'atmosphère	128
4.2.6	Estimation des paramètres du sol	128
4.2.7	Estimation des paramètres du panache	129
4.3	Validation et analyse des différentes étapes de la caractérisation du panache.	137
4.3.1	Introduction	137
4.3.2	Étude de la détection du panache	137
4.3.3	Étude de la classification de la scène	142
4.3.4	Performances de l'estimation de la luminance de fond	151
4.3.5	Performances de l'estimation des paramètres de surfaces	162
4.3.6	Étude de l'approche linéaire pour l'initialisation de CONLIE	168
4.4	Conclusion	183

5	Application de la méthode CONLIE sur différentes scènes industrielles	185
5.1	Introduction	185
5.2	Performances de la méthode CONLIE sur des données synthétiques	185
5.2.1	Initialisation de la température du panache	186
5.2.2	Analyse de la convergence de la méthode CONLIE	187
5.2.3	Analyse des performances d'estimation par la méthode CONLIE	192
5.3	Application de la méthode CONLIE sur des images réelles	199
5.3.1	Présentation des données	199
5.3.2	Traitements préliminaires	200
5.3.3	Résultats de la méthode CONLIE	205
5.4	Conclusion	210
	Conclusion et perspectives	213
	Bibliographie	219
	Annexes	225
5.5	Annexe I : Résultats détaillés des classifications des scènes synthétiques	225
5.5.1	Scénario 1a (raffinerie)	226
5.5.2	Scénario 1b (raffinerie)	229
5.5.3	Scénario 2a (cimenterie)	232
5.5.4	Scénario 2b (cimenterie)	235

Résumé

Les émissions atmosphériques sont un enjeu majeur pour la société, à la fois pour les problématiques de santé – qualité de l’air (maladies respiratoires, allergies,...) que pour celles liées au réchauffement climatique et aux gaz à effet de serre. Les sources anthropiques, industrielles en particulier, émettent dans l’atmosphère gaz et aérosols qui jouent un rôle important dans les échanges atmosphériques. Néanmoins leur suivi à haute résolution spatiale en termes de facteurs d’émission reste peu précis et lacunaire. Cela s’explique par une grande diversité des espèces émises sur un site industriel, et par la complexité de la modélisation des phénomènes de chimie-transport prenant en compte ces interactions multi-sources.

Nous nous sommes intéressés au cours de cette thèse à la caractérisation des émissions anthropiques d’espèces gazeuses et à la cartographie de leurs concentrations près des sources, par imagerie hyperspectrale infrarouge aéroportée à haute résolution spatiale.

Une première partie a été consacrée au développement d’un outil de simulation de scènes hyperspectrales. L’intérêt de cet outil réside dans la maîtrise totale de tous les paramètres de la scène, qui nous a permis de réaliser une étude de sensibilité détaillée des perturbateurs du signal hyperspectral infrarouge en présence de panache.

Dans un second temps, une nouvelle approche de caractérisation des effluents gazeux, CONLIE (*Constrained Optimal Non-Linear Iterative Estimator*), est proposée. Cette méthode est composée d’un algorithme de détection de panache, d’une classification de la scène selon la nature des matériaux la composant, et d’une régression non-linéaire itérative permettant d’estimer la distribution 3D des concentrations des différents gaz.

Lors de la dernière partie de nos travaux, nous avons réalisé une étude de sensibilité de notre approche de caractérisation de panache, à l’aide de données synthétiques. Enfin, une validation de cette méthode sur des images synthétiques et réelles, a permis d’illustrer son apport par rapport aux différentes approches rencontrées dans la littérature.

Mot clés : Imagerie hyperspectrale, Spectroscopie infrarouge, Panache de gaz, Régression non-linéaire, Détection, Caractérisation, Classification.

Abstract

Gaseous pollutants characterization using airborne hyperspectral measurements at high spatial resolution :

The air pollution is a very important issue for industrialized society, both in terms of health (respiratory diseases, allergies,...) and in terms of climate change (global warming and greenhouse gas emissions). Anthropogenic sources, especially industrial, emit into the atmosphere gases and aerosols, which play an important role in atmospheric exchanges. However emissions remain poorly estimated as most of existing space sensors have a limited spectral range as well as a too low spatial resolution. The availability of the new hyperspectral airborne image sensors in the infrared range opens the way to new development to improve the plume characterization.

The aim of this work is to provide, from the hyperspectral airborne measurements, a 3D distribution of the plume gases concentrations.

The first part of our work is devoted to the development of hyperspectral scenes simulation tool. Its advantage is to have a total control of all parameters of the scene, which allowed us to make a detailed sensitivity analysis of disruptive parameters of the infrared hyperspectral signal in the presence of panache.

In a second part, a new method for detecting and characterizing gas plumes, CONLIE (*Constrained Optimal Non-Linear Iterative Estimator*), is presented. This method consists of a plume detection algorithm, a classification of the scene according to the nature of the materials component, and an iterative nonlinear regression to estimate the 3D distribution of the concentrations of the different gases.

Then, we performed a sensitivity study of our plume characterization approach, using our synthetic data. Finally, a validation of CONLIE on both synthetic and real data, has illustrated its contribution over the existing methods.

Keywords : Hyperspectral imagery, Infrared spectroscopy, Gaseous plume, Non-linear regression, Detection, Characterization, Classification.

Remerciements

ElHamdoulilah, ma thèse est terminée. Enfin presque ! Il me reste encore à rédiger les remerciements. Il paraît que c'est la partie la plus lue des mémoires de thèses (voire la seule). Je ne vais donc pas vous priver, chers amis lecteurs, de ce plaisir de chercher vos prénoms dans mes remerciements. Et si vous ne le trouvez pas, bien qu'il mérite d'y figurer, sachez que c'est par oubli. Soyez-en sûrs *la reconnaissance est la mémoire du cœur* (Hans Christian Andersen) et non pas celle du cerveau. On peut donc oublier, sans pour autant ne pas être reconnaissant.

Pour commencer, je tiens à remercier Cathy Quantin et François-Marie Bréon, pour avoir accepté la tâche de rapporter le présent manuscrit dans un délai relativement court. De même, je remercie Grégoire Mercier d'avoir présidé mon jury de thèse. Je vous remercie aussi pour l'intérêt que vous avez porté à mes travaux, et aux conseils d'amélioration que vous m'avez donnés.

Je tiens aussi à remercier sincèrement mon encadrant Pierre-Yves Foucher. Merci pour ta disponibilité, ton soutien, ta patience et la confiance que tu m'as accordée. J'ai beaucoup apprécié de travailler avec toi. Merci aussi pour le repas dans ta maison, les nombreuses pauses cafés et parties de coinche en début de thèse.

Un grand merci pour Xavier Briottet, mon directeur de thèse. Tu as toujours su garder le cap de cette thèse et recadrer mes efforts quand il le fallait.

Par ailleurs, je tiens à exprimer ma reconnaissance à Emmanuel Zenou et Manuela Grippa, mes deux professeurs à Supaéro qui m'ont initié au traitement d'images et à la télédétection, et qui étaient présents lors de ma soutenance.

Merci beaucoup, merci énormément, exprimer sa gratitude ou sa reconnaissance, présenter ses remerciements, remercier, . . . Certes la langue française ne manque pas d'expressions que je pourrais utiliser dans ce qui suit, mais pourquoi s'adonner à cet exercice fastidieux de choisir une expression à chaque nouvelle personne remerciée. Je me contenterai de citer les noms des personnes, et implicitement c'est un grand merci que je leur adresse.

J'ai effectué ma thèse dans l'unité POS du DOTA Toulouse. Une dizaine de personnes composait cette unité. Et parmi eux, il y avait un bonhomme génial : très sympathique, toujours souriant, ayant beaucoup d'humour et surtout très humble. Laurent (Poutier), tu as toujours été disponible pour répondre à mes questions et m'expliquer ton code COMANCHE, que j'ai pu utiliser. Tu m'as souvent encouragé. Tu es de loin le *permanent* que j'ai le plus apprécié durant mon séjour à l'ONERA, à la fois pour ta générosité et ton noble caractère.

La lune ne cachant pas les étoiles, il y avait aussi d'autres personnes que j'ai apprécié côtoyer durant ma thèse. Véronique, Françoise et Sophie le trio féminin de POS, rejoint plus tard par Rosa et Marion, pour leur gentillesse. Yannick le chef de l'unité, pour sa qualité d'écoute et son soutien, sans oublier sa sympathie et sa gentillesse. Dominique (Leger) parti à la retraite avant la fin de ma thèse, il n'a pas hésité à revenir pour assister à ma soutenance. Sans oublier la fois où il m'a aidé à changer les essuies-glaces de ma voiture. Joël, lui aussi parti à la retraite, avait une personnalité attachante, des discussions intéressantes et un charmant accent du Sud. Olivier, j'aime ton esprit critique et ton

indépendance, ne change en rien ! Je te souhaite une bonne retraite pleine d'activités et de voyages intéressants. Certes c'est dans trois ans ; mais ma thèse m'a appris que trois ans, ça passe très vite. À POS il y avait aussi François, Philippe, et puis Xavi (prononcer Chabi) qui est entré durant le temps additionnel de ma thèse. Ce Barcelonais de cœur et d'origine - comprenez supporteur inconditionnel du Barça - a apporté sa fraîcheur sur le terrain, avec beaucoup de discussions intéressantes et des conseils avisés. Devenu très récemment Papa, je lui souhaite tout le bonheur du monde avec sa petite famille. Et bien sûr, *Visca el Barça* et *Allez l'OL!!!*

Au DOTA, il y a aussi l'unité des « chefs » : GOTA. D'abord, il y a Geneviève, secrétaire et personnage clé du département. Elle représente en effet, la mémoire vivante du département. Très accueillante, gentille et avec un instinct maternel hors norme. Tous les doctorants étaient un peu ses enfants. Je ne peux parler de Geneviève sans parler de son mari : Michel Corrège, un camarade, puisque c'est un ancien de Supaéro. Après leur départ à la retraite, Geneviève a été remplacée par Vincenza, une femme très sympathique qui m'a beaucoup aidé pour la préparation administrative de ma soutenance. Pour l'anecdote, elle aussi est l'épouse d'un ancien camarade. Manola l'autre femme au GOTA, bien que très discrète est très gentille. Il y a aussi le Maître Pierre-Louis, Maître des clés ! Un homme très sympathique et chaleureux. J'appréciais bien commencer mon tour des bureaux par le sien, ça me donnait une sorte d'énergie positive, pour bien entamer la journée. Enfin, je ne dois pas oublier Bernard Rosier, chef du DOTA, qui m'a accepté dans son département. Il semblerait d'ailleurs, que nous ayons effectué notre école prépa dans le même lycée : Lycée du Parc !

La dernière unité du DOTA Toulouse est IODI. Dans cette dernière, il y avait Thierry qui m'a pas mal aidé, pour comprendre la modélisation physique des absorbances des gaz. Il partage le bureau avec Thibaut le polytechnicien du département. Dans le bureau d'en face, il y avait Christian. Bien qu'on ait des positions politiques diamétralement opposées, j'ai beaucoup apprécié échanger avec toi aussi bien sur la politique que sur d'autres sujets. Pour ses discussions intéressantes et sa sympathie, je tiens à citer Xavier (Orlik). J'ai presque oublié qu'on a partagé théoriquement le même bureau. De cela, je retiendrai le tas de papier déposé sur le bureau qui a l'air de dire que le bureau est occupé, et surtout les appels que je transférais au 2618 :). Le tour de IODI continue avec Michel. Avec ce Méditerranéen par excellence, je partage deux grandes passions : l'Algérie pays de naissance et d'enfance, et la Mer. Si un jour il te prend l'envie d'aller plonger sur les côtes d'Algérie, ce serait avec plaisir que je te servirai de guide. Le bureau d'à côté, était partagé par Dominique (Hamoir) et Nicolas (Rivière). Je ne peux parler de Nico, sans citer son père spirituel Laurent (Hespel) son directeur de thèse et maintenant son chef d'unité. Il y a aussi son fils spirituel, Romain qui a fait sa thèse sous l'encadrement de Nico. Puis a été embauché, après un séjour d'un an au Japon. Pour finir le tour de IODI, je ne dois pas oublier Bernard (Tangy) le sportif, Bernard (Guillaume), Jacques l'humaniste, Jean-Pierre l'acteur du théâtre, et Thomas (Rivière) qui nous a rejoint récemment.

Chaque année, les couloirs du DOTA s'enrichissent d'un flot de stagiaires d'apprentis et de doctorants qui viennent pour rajeunir la moyenne d'âge. Pour commencer j'adresse un grand Coucou à Béatrice (avec qui j'ai partagé le bureau durant quelques mois) et Lilian les deux apprentis présents au début de ma thèse. Pour le premier arrivage de stagiaires, ce n'était pas tant la quantité mais la qualité, qui était au rendez-vous. On a vu passer Nicolas le Breton et Céline la cuistot. J'ai hâte d'être à ta soutenance de thèse le 15 octobre 2015 pour goûter à tes macarons, cupcakes et autres délices que tu sais très bien concocter. En tout cas, ça m'a fait plaisir de te revoir lors de la conférence WISPERS. Ensuite, il y a eu Adrien, Cécile et Lucie. La troisième année était sous le signe du sagittaire (ou plutôt du stagiaire). Il y en avait beaucoup ! Et étaient tous sympas ! Il y avait Emma L'archéologue d'une semaine, Julien et Yannick avec qui on a remporté la coupe du « Soccer du canal » contre les équipes étudiantes de Toulouse et aussi le tournoi inter-département de l'ONERA (pour le deuxième ce n'était pas trop une surprise, puisque je l'ai organisé ;), il y a

eu aussi Michael, Quentin et Juliette. Puis, Josselin arrivé en dernier, mais avec qui j'ai beaucoup discuté. Sa présence à ma soutenance m'a fait super plaisir. Lors de cette troisième année, il y a eu aussi l'arrivée d'un nouvel apprenti : Benoît. Enfin, lors de la dernière année, j'ai eu la chance de co-encadrer Thomas (Vidal). C'était un plaisir de travailler avec toi ! Je te souhaite vraiment de réussir ta thèse à Bordeaux et n'hésite pas à me donner de tes nouvelles ! Les autres stagiaires étaient : Raphaël, Jonathan et Steven. Malheureusement, je n'ai pas pu mieux les connaître car j'étais en phase finale de rédaction. Mais pour le peu des discussions / matchs de foot que j'ai partagés avec eux, j'aurais aimé les connaître dans d'autres circonstances.

Maintenant place à mes compagnons de galère : les doctorants. Honneur aux anciens, je commence par Guillaume (dit le « hobbit ») ce cinéphile lorsqu'il est en mode citadin, peut se transformer en grand aventurier pour parcourir la Nouvelle-Zélande. Sans aucune peur du ridicule, il peut aller au restaurant universitaire en peignoir de bain. Chapeau bas ! J'ai apprécié ton retour ces derniers mois, et ta participation au tournoi de foot en chaussures de Rando ? ! Mais malheureusement l'ambiance DOTA n'est plus ce qu'elle était.

Ensuite, il y a Myriam, une pro de la course d'orientation dans Toulouse. Encore, désolé pour le vol en TB20 que vous avez bien mérité, mais que vous n'avez pas effectué en raison de la météo. Pour la promotion juste avant la mienne, il y avait Romain évoqué ci-dessus (équipe IODI), Thomas (Ristorcelli) que j'ai connu dans une vie antérieure au club micro-drone et JTS. Et bien sûr la superactive de l'équipe : Karine. Passionnée de Rando, elle a fini le fameux GR20 en Corse. J'ai apprécié discuter avec elle lors des nombreuses pauses café, et j'ai bien aimé le voyage à Nantes lors de la conférence EARSEL. Bon courage à toi pour la suite de ta carrière.

Dans mon année, il y avait Erwan à qui je souhaite bon courage pour sa soutenance. Bien sûr, il y a eu aussi les deux Manu(e)s, que je réserve pour la fin.

La promotion après moi, il n'y a eu que Pierre (L'Afrique) un passionné d'escalade, au point où je l'imagine volontiers en train d'escalader les façades du labo ! Il a réussi à convertir plus d'un à sa passion, mais pas moi. J'ai aimé quand même l'initiation à l'escalade, qu'il nous a proposé. Il a aussi été un précieux élément de l'équipe de foot du département, et son absence s'est fait sentir au dernier tournoi inter-département. Bon courage pour ta soutenance !

En début de ma troisième année, j'ai assisté à un grand arrivage de thésards : Charlotte la féministe-actrice-cuisinière-philosophe, Vincent que je connaissais déjà (enfin c'est ce que je croyais), Lætitia qui s'est réfugiée à Grenoble mais grâce à qui je me suis senti moins seul aux pauses de la conférence WISPERS à Lausanne, Antoine avec qui j'appréciais discuter de tout et de rien et Jan (lui aussi je le réserve pour la fin).

Dernier arrivé dans la catégorie doctorant, c'est Thierry (Erduel) avec qui j'ai partagé le bureau. Du coup, tu as dû me supporter durant ma dernière année de thèse. En tout cas, c'était toujours un plaisir d'échanger avec toi. Je te souhaite beaucoup de bonheur avec ta petite famille.

Durant ma thèse j'ai eu la chance de rencontrer d'autres thésards d'autres départements, avec qui j'ai partagé des moments agréables. Il y a eu Brahim que j'ai rencontré au futsal et son ami Farid dont j'ai eu le plaisir de le retrouver dans un train pour Lyon. Ils m'ont donné des conseils précieux pour bien gérer ma fin de thèse. Au futsal/foot, j'ai connu plein d'autres personnes sympathiques avec qui j'ai partagé de très bons moments. Sans être exhaustif voici les prénoms qui me viennent à l'esprit : Franck, Thomasz, Julien, Benjamin, Christophe, Jonhatan, Alvaro, Hélène, Nico, Kévin, Luca, David, ...

Il y avait aussi Nathalie, une camarade de promo de Supaéro et épouse d'un camarade de promo, je vous souhaite tout le bonheur du monde avec la petite Abigaëlle. Sara, Gianluca et Hélène avec qui j'ai apprécié discuter.

Je ne pourrai clôturer le chapitre des collègues de l'ONERA sans parler de l'équipe du poste de garde, ils m'ont beaucoup encouragé surtout à la fin de ma thèse lorsque je devais passer tous les matins

pour récupérer un badge visiteur. Il y a aussi l'équipe de la repro et MTG, pour leur sympathie.

Ma réussite en thèse était aussi dû à des personnes de mon entourage qui m'ont beaucoup soutenu moralement. Je tiens à les remercier tous, mais je ne pourrai malheureusement pas tous les citer. Je remercierai en particulier Cheikh Tatai, Si Aissa, Ibrahim, Karim, Youssef, Houssam, Ismail (Batou), Ghallem, Achraf, Ahmad et Meziane. Et plus généralement, tous mes amis qui m'ont encouragé ou prié pour que ma thèse se passe bien.

Il y a aussi mes amis et anciens camarades que la distance géographique n'a pas découragé pour suivre l'évolution de ma thèse : Salah eddine et Ismail (Arjdal) (Angleterre), Obaid et Ryad (Liège), Irfane et Mohamed (Lyon), Edriss (Autriche), Samy (Arabie), Othman (Chine), Radouane (Canada), Frédéric et Lucia (USA), Michela (Kourou puis Allemagne), Haïfa (Émirats arabes unies), ... Je ne dois surtout pas oublié un autre groupe d'amis qui m'ont aussi beaucoup apporté durant cette thèse : Éric (Cerrutti), Papy (Romain pour les intimes) et sa future épouse Monica (Allez je vous fait de la pub), Steven, Bastien, Nathalie (Burckhardt), Raja et Clément qui m'ont aidé à surmonter les moments les plus difficiles.

Il y a aussi Mohamed (Bouhlel), Asma et Ahmad (Al-Youssef) avec qui je me suis bien marré en dernière année. Vous avez dû supporter mes sauts d'humeur et mes états d'âme plus d'une fois. Vous m'avez beaucoup aidé pour recharger les batteries, tous les midis au RU! Et c'était un grand plaisir de jouer avec vous au foot, et cerise sur le gâteau : porter la coupe du « Soccer du canal ». Malheureusement, on n'a pas pu réitérer l'exploit. Bref, Merci pour tout et bon courage à vous pour la suite.

Il est temps de remercier mes trois compagnons de route que j'ai laissé pour la fin. Le premier est Jan, un rêveur dans l'âme, jamais stressé, le cœur sur une main, une cigarette dans l'autre (j'ai pas réussi à la lui faire jeter, Bon sang pense à ta santé!!!). On a partagé le même bureau durant 2 ans (enfin quand il sortait de son labo au sous-sol, pour voir un peu de lumière), et il m'a offert son hospitalité durant une semaine. On a partagé pas mal d'aventures, la meilleure est sans doute la virée à Foix un dimanche aprem, alors qu'on devait juste prendre l'air dans le parc de la confluence. Bref, Jan tu m'as apporté beaucoup de réconfort durant ces deux ans, et je t'en remercie.

Ensuite, il y a eu les deux Manu(e)s qui partageaient le même bureau à mon arrivée. Honneur aux femmes, commençons par Emmanuelle (ou au choix : Miss M, Manue, Emma). Trop dur d'écrire quelques lignes sur l'ambassadrice officielle du Berry! Nos thèses étaient un peu comme deux lignes parallèles : même début et même fin à quelques jours près, mêmes démarches administratives, mêmes formations, bref mêmes galères. Froide et réservée au premier abord, comme si elle était la gardienne d'un grand Mystère. On découvre très vite une personne au grand cœur, qui n'hésite pas à sacrifier ses vacances pour aller construire des écoles en Afrique. Emmanuelle, je te remercie beaucoup pour ta qualité d'écoute et ta grande patience. Tes frères devaient avoir beaucoup de chance d'avoir une Sœur Emmanuelle¹ à la maison². Bon courage pour la suite de tes projets!

Le deuxième des Manu(e)s est Manuel, ce Toulousain parti se réfugié à Grenoble durant une partie de sa thèse, a aussi partagé notre bureau à mi-temps. Il est toujours souriant même dans les moments les plus difficiles. Lui aussi m'a beaucoup encouragé, et il a même fait le déplacement depuis Lausanne pour assister à ma soutenance. Bon je ne dirais pas plus sur ce dernier épisode;) Je te souhaite bon vent et beaucoup de Bonheur. De toute façon, je ne m'en fais pas trop pour toi, car celui qui sème le sourire récolte le bonheur :) Nice!!!

Pour finir ma liste d'amis qui ont contribué à ma réussite de thèse, j'ai gardé le meilleur pour la fin! Ceux qui nous connaissent savent qu'il s'agit d'Antoine (Riols) :). A Supaéro j'ai eu un diplôme, mais mieux encore j'ai eu des amis. Et en tête de liste, il y a Antoine! (Je tiens à préciser que je ne classe pas mes amis, c'est juste une manière de parler). Tant de voyages à travers les pays, tant

1. dans les deux sens du terme : même prénom, même grandeur d'âme.

2. Il fallait bien que je la place un jour cette blagounette :)

de séances de muscu, tant d'appels téléphoniques pour me remonter le moral même depuis l'autre côté de la Manche. Je te souhaite vraiment beaucoup de bonheur, et surtout de trouver rapidement la femme de ta vie et fonder un foyer, et ouais les amis c'est bien mais une famille c'est encore mieux ;)

On entend parfois dire qu'on choisit ses amis mais pas sa famille. Moi si je devais choisir ma famille . . . , Bah je garderai la mienne. Je profite de ce paragraphe pour vous dire à quel point je vous aime. Maman et Papa, j'espère que vous êtes contents et fiers de moi ! Vous m'avez beaucoup apporté dans ma vie, vous avez toujours été là pour moi. Et même si toutes les 250 prochaines pages n'étaient que des remerciements pour vous, cela ne sera pas suffisant. Un grand Merci ! Ensuite, il y a mes deux frères : Tarek, qui m'a prêté son PC portable pour que je puisse finir mon travail, et Akram qui débute ses études universitaires au moment où moi je termine les miennes. Bon courage à toi !

Mes deux grands-mères que j'appelle affectueusement Mamma Zoubaida et Mamma Mbarka, qui n'ont eu de cesse de prier pour moi. Mon grand-père Mohamed (Rabi Yerhmou) que la mort a pris au milieu de ma thèse. Il y a aussi mes Tantes et Oncles et leur conjoints respectifs, et mes nombreux cousins et cousines ainsi que leur petites familles respectives. Je n'oublierai pas Tata Nadia et Tata Fatiha pour leur encouragement.

« Hier, j'étais intelligent et je voulais changer le monde. Aujourd'hui, je suis sage et je me change moi-même. » (Rumi). C'est peut être le seul enseignement que je garderai de ma thèse, et je remercie ceux qui m'ont aidé à le comprendre.

Sigles et acronymes

Généralités

ACP	Analyse en Composantes Principales (cf. PCA)
COV	Composés Organiques Volatils
COVNM	Composés Organiques Volatils Non Méthaniques
FCC	Fluid Catalytic Cracking
ICV	Indices Cartographiques de Validation
IPC	Indices de Pureté de Classes
IRT	InfraRouge Thermique
LWIR	Long-Wavelength InfraRed
MC	Matrice de Confusion
MWIR	Mid-Wavelength InfraRed
NEDT	Noise Equivalent to Differential Temperature
NIR	Near InfraRouge
PCA	Principal Component Analysis (cf. ACP)
POP	Produits Organiques Persistants
RGB	Red Green Blue
RMSEP	Root Mean Square Error of Prediction
stdev	Standard deviation
SWIR	Short-Wavelength InfraRed
UV	Ultra Violet
VIS	VISible

Organismes et institutions

ADEME	Agence De l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Energie
ATE	Advanced Technologies & Engineering Co.
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DOTA	Département Optique Théorique et Appliquée

INERIS	L'Institut National de l'EnviRonnement Industriel et des RisqueS
ITRES	Constructeur canadien de caméras hyperspectrales
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory
RDDC	Recherche et Développement pour la Défense Canada
RIT	Rochester Institute of Technology

Programmes scientifiques et Codes de calcul

4A/OP	Automatized Atmospheric Absorption Atlas
ADMS	Atmospheric Dispersion Modelling System
AUSTRAL2000	Code de calcul pour une modélisation lagrangienne de la dispersion
CAFE	Clean Air For Europe
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFX	Code de calcul pour la dynamique des fluides
CHIMERE	Modèle eulérien de chimie-transport
COMANCHE	COde de Modélisation pour l'ANalyse des Cibles Hyperspectrales vues en Entrée instrument
DIRSIG	Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation
FLACS	FLame ACceleration Simulator
FLEXPART	FLEXible PARTicle dispersion model
FLUENT	Code de calcul pour la dynamique des fluides
HYSPLIT	HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IREP	Registre Français des émissions polluantes
IR-SAGE	the InfraRed Systems Analysis in General Environments
MATISSE	Modélisation Avancée de la Terre pour l'Imagerie et la Simulation des Scènes et de leur Environnement
MOCAGE	MOdèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
MSS	Micro-Swift-Spray
PREV'Air	PREVision qualité de l'AIR
STAR-CD	Code de calcul pour la dynamique des fluides
TIGR	Thermodynamic Initial Guess Retrieval
VDI GUIDLINE	Verein Deutscher Ingenieure Guidline

Capteurs et Campagnes de mesure

AERONET	AErosol RObotic NETwork Sun-photometers
AeroSPIM	Caméra hyperspectrale dans l'infrarouge thermique développée par ATE
AHS	Airborne Hyperspectral Scanner
AIRS	Atmospheric InfraRed Sounder
AisaOwl	Caméra hyperspectrale dans l'infrarouge thermique développée par AeroSPIM
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CAPITOUL	Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer
DISCOVER-AQ	Deriving Information on Surface conditions from Column and Vertically Resolved Observations Relevant to Air Quality
EARLINET	European Aerosol Research Lidar NETwork
ESCOMPTE	Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emissions
HyperCam-LW	Hyperspectral Camera - LongWave
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
LIDAR	LIght Detection And Ranging
MASI	Midwave Airborne Spectrographic Imager
MOPITT	Measurements Of Pollution In The Troposphere
SEBASS	Spatially-Enhanced Broadband Array Spectrograph System
Sieleters	Caméra hyperspectrale dans l'infrarouge développée par l'ONERA
TASI	Thermal Airborne Spectrographic Imager
TES	Tropospheric Emission Spectrometer

Algorithmes

AAC	Autonomous Atmospheric Compensation
CB	Clustering-Based estimation method
CONLIE	Constrained Optimal Non-Linear Iterative Estimation
CSB	Clustering-based Selected-Band
ELS	Extended Least-Squares
ELSI	Iterative Extended Least-Squares
GLR	Generalised Likelihood Ratio
GLRT	Generalised Likelihood Ratio Test
GLS	Generalized Least-Squares
GLSF	Final Generalized Least-Squares
GLSI	Iterative Generalized Least-Squares
ISAC	In-Scene Atmospheric Compensation
ISSTES	Iterative Spectral Smoothness of Temperature and Emissivity Separation
MCMC	Markov Chain Monte Carlo

MSD	Matched Subspace Detector
NLS	Nonlinear Least-Squares
OBS	Orthogonal Background Suppression
OLS	Ordinary Least-Squares
PM	Particulate Matter (Aérosol)
SAM	Spectral Angle Mapper
SB	Selected Band
SmaC	Smoothness and Continuity
SMF	Spectral Matched Filter
SpSm	Spectral Smoothness
SVD	Singular Value Decomposition
TES	Temperature and Emissivity Separation

Introduction

Le suivi et la maîtrise de la pollution atmosphérique sont des enjeux majeurs pour les sociétés industrialisées. Sur le plan sanitaire, les polluants les plus préoccupants sont l’ozone troposphérique et les particules fines (aérosols). Une exposition à ces polluants peut provoquer des effets allant des troubles respiratoires légers au décès prématuré [1]. Ainsi, le programme CAFE (*Clean Air For Europe*) de la commission européenne a estimé qu’en France en 2000, 42 000 décès par an étaient liés à une exposition chronique aux aérosols PM_{2,5} (particules fines de diamètre inférieur à 2.5 μm) d’origine anthropique [2].

Par ailleurs, le dépôt de certaines substances acidifiantes, telles que : l’oxyde d’azote, le dioxyde de soufre ou l’ammoniac, nuit aux écosystèmes. Ce qui peut entraîner la disparition d’espèces végétales et animales. L’ozone troposphérique ralentit la croissance des espèces végétales, en lui causant des détériorations physiques [1]. Plus grave encore, les émissions de gaz à effet de serre, à l’origine du réchauffement climatique, augmentent l’occurrence de catastrophes environnementales à très grande échelle.

D’autre part, les dépôts de polluants atmosphériques attaquent les matériaux et dégradent ainsi les bâtiments et les monuments.

Sur un plan sécuritaire, détecter et quantifier les émissions de certains effluents constituent un enjeu de taille, notamment sur le terrain d’un conflit ou pour le renseignement. Enfin, le suivi des émissions gazeuses peut contribuer à la prévention des catastrophes industrielles ou à leur maîtrise.

On comprend donc le fort intérêt que représentent l’étude et le suivi de la pollution atmosphérique.

La nature des sources de la pollution de l’air est très variée. Elle peut être naturelle : volcans, feux de forêts, etc. ou anthropiques : combustion de biomasse, transports, production d’énergie, industries, occupation des sols et agricultures. Les effluents rejetés dans l’atmosphère sont aussi variés que les sources qui les rejettent. On retrouve des espèces gazeuses, telles que : le dioxyde de carbone (CO₂), le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d’azote (NO_x), les composés organiques volatiles (COV), le dioxyde de soufre (SO₂), l’ammoniac (NH₃), ... et des aérosols de différentes tailles.

Les émissions anthropiques d’effluents atmosphériques font l’objet de travaux scientifiques afin

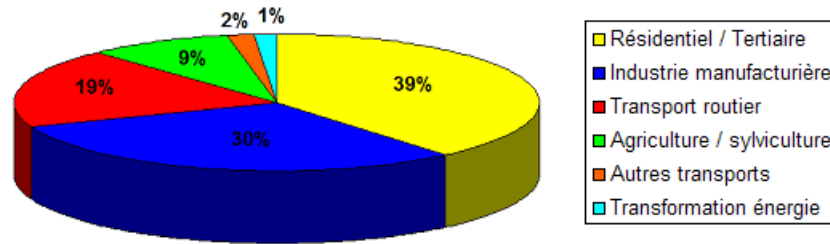


FIGURE 1 – Répartition des émissions atmosphériques d'aérosols PM 2.5 par secteur d'activité pour l'année 2011 en France métropolitaine, selon les chiffres du CITEPA (<http://www.citepa.org>)

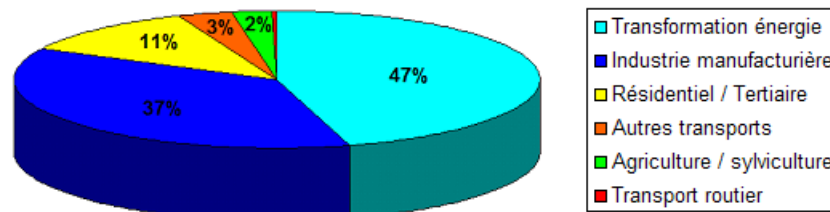


FIGURE 2 – Répartition des émissions atmosphériques du SO₂ par secteur d'activité pour l'année 2011 en France métropolitaine, selon les chiffres du CITEPA (<http://www.citepa.org>)

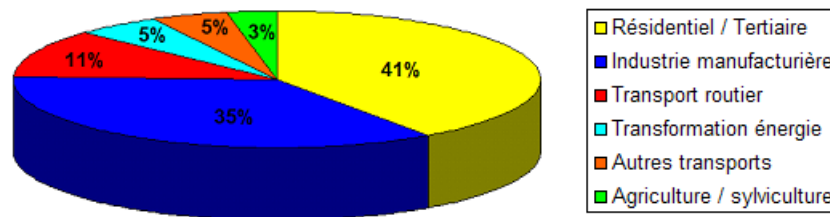


FIGURE 3 – Répartition des émissions atmosphériques des COVNM (Composées organiques volatiles non méthaniques) par secteur d'activité pour l'année 2011 en France métropolitaine, selon les chiffres du CITEPA (<http://www.citepa.org>)

d'évaluer leurs impacts sur les différentes questions soulevées par la pollution atmosphérique (santé – qualité de l'air, environnement, climat, etc.). Ainsi, l'ONERA a lancé en 2011 un projet interne SEPIA (Surveillance des Émissions de Polluants Industriels dans l'Atmosphère). Ce dernier vise à mettre en place des outils performants, pour le suivi à haute résolution spatiale des émissions des sources industrielles de pollution atmosphérique [Foucher et al., document interne ONERA]. C'est dans le cadre de ce projet que s'inscrit cette thèse. Son objectif est de développer une méthode de caractérisation des panaches industriels à haute résolution spatiale, à l'échelle d'un site industriel. Cette dernière permettra d'une part de fournir des données sur la spatialisation des émissions atmosphériques d'une usine donnée ; et d'autre part d'apporter un soutien lors de la gestion des accidents industriels. Les outils développés, doivent être applicables pour toutes les industries possibles, et pour n'importe quel site industriel.

Les agences spécialistes de la qualité de l'air comme le CITEPA (*Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique*) et certains acteurs de l'industrie fournissent des bulletins annuels sur les quantités de polluants rejetés dans l'atmosphère. Néanmoins, ces informations ne peuvent pas être exploitées dans le suivi des émissions sur les sites industriels, car elles ne sont pas toujours disponibles pour des raisons de confidentialité. Même lorsqu'elles sont accessibles, ces données prennent rarement en compte la variabilité des émissions industrielles selon la cadence des usines.

Aussi, plusieurs techniques ont été mises à contribution pour l'étude et le suivi des émissions atmosphériques. Ainsi, des bilans de pollution à l'échelle de la planète ou des continents sont réalisés à partir des données fournies par des instruments embarqués sur des satellites. On peut citer à titre d'exemple : MOPITT (*Measurements Of Pollution In The Troposphere*) [3], AIRS (*Atmospheric InfraRed Sounder*) [4], TES (*Tropospheric Emission Spectrometer*) [5] et IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) [6]. L'inversion des données fournies par ces instruments permet l'estimation des concentrations de plusieurs gaz présents dans l'atmosphère, tels que : CO_2 , O_3 , SO_2 et CH_4 . Les données acquises par ces instruments permettent d'établir un suivi de la pollution sur toute la surface terrestre, et avec une bonne résolution temporelle (taux de revisite des satellites de l'ordre de la journée) [7]. Cependant, avec une résolution spatiale de l'ordre de plusieurs kilomètres et un faible taux d'échantillonnage, cette approche est inadaptée au suivi des panaches industriels.

Pour pallier aux inconvénients des mesures satellites, des instruments de télédétection passifs (spectromètres ou photomètres) ou actifs (lidars) sont utilisés pour détecter et caractériser des émissions à l'échelle locale. Embarqués sur des avions ou utilisés depuis le sol, ces instruments fournissent des données avec une résolution spatiale compatible avec l'étude des sites industriels.

Par ailleurs, il existe de nombreuses stations d'observation regroupées en réseaux de mesures. Nous pouvons citer le réseau AERONET³ (*AErosol RObotic NETwork Sun-photometers*) dédié à l'étude des aérosols par mesures de photométrie. Le réseau EARLINET⁴ (*European Aerosol Research Lidar NETwork*) regroupe des stations d'étude d'aérosols par lidars. Enfin, le réseau français PREV'Air⁵ (*PREVision qualité de l'AIR*) cartographie, à différentes échelles, les concentrations de certains gaz et aérosols. Ce réseau se base sur un couplage des modèles de chimie-transport (CHIMERE et MOCAGE) avec des mesures par prélèvement. L'analyse des échantillons prélevés se fait par séparation physico-chimique des polluants présents. Cette étape est alors suivie par une détec-

3. AERONET : <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

4. EARLINET : <http://www.earlinet.org/>

5. PREV'Air : <http://www.prevoir.org/fr/index.php>

mination des concentrations des polluants cibles, par une des techniques existantes (spectrométrie de masse, granulométrie optique, etc.) [8].

Assez régulièrement des campagnes de mesures et d'études de la pollution atmosphérique sont réalisées. Bien qu'elles aient diverses motivations et objectifs, ces campagnes permettent de valider les modèles et outils d'inversion développés, et d'enrichir les bases de données. D'autant plus, qu'elles combinent souvent plusieurs outils et techniques de mesures. Ainsi, la campagne de mesures ESCOMPTE [9] (*Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Émissions*) en région PACA a mis à contribution plusieurs types d'instruments (Lidars sol, lidars aéroportés, mesures in-situ, radiosondage, ...) pour l'étude des aérosols pendant les épisodes de fortes pollutions. Par ailleurs, plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées par la NASA, dans le cadre du programme de recherche DISCOVER-AQ⁶ (*Deriving Information on Surface conditions from Column and Vertically Resolved Observations Relevant to Air Quality*). Ce programme dispose d'un panel très large d'instruments aéroportés ou depuis le sol : (lidars, spectromètres, in-situ, ...).

Dans le cadre de cette thèse, l'imagerie hyperspectrale aéroportée est l'instrumentation de base que nous allons exploiter afin de caractériser les effluents gazeux. En effet, les développements techniques récents sur les imageurs hyperspectraux aéroportés, en termes de résolution spectrale et spatiale, en font un outil performant pour l'étude et le suivi, avec une haute résolution spatiale, des émissions des sites industriels. D'une part, la très haute résolution spatiale de ces imageurs (résolution métrique), nous permet d'avoir un suivi très résolu spatialement des émissions atmosphériques des zones industrielles. D'autre part, ces instruments couvrent avec une bonne résolution spectrale l'ensemble du domaine optique (du visible jusqu'à l'infrarouge thermique). Ce qui permet de quantifier la majorité des gaz d'intérêt. Lors de nos travaux nous nous sommes restreints uniquement aux bandes MWIR (*Mid-Wavelength InfraRed*) et LWIR (*Long-Wavelength InfraRed*), correspondant respectivement aux bandes spectrales des fenêtres atmosphériques [$3 - 5 \mu m$] et [$7.5 - 12.5 \mu m$].

Le présent document synthétise l'ensemble des travaux effectués lors de cette thèse, il est divisé en cinq parties.

Le premier chapitre examine les différents aspects de l'objet de notre étude : les panaches anthropiques de gaz. Il fait l'inventaire des différents gaz rencontrés, expose les réglementations sur les seuils d'émission de ces polluants puis présente le comportement radiatif des panaches industriels. Le deuxième chapitre est consacré à la synthèse d'images hyperspectrales de scènes industrielles. Les outils employés pour la modélisation de ces scènes sont d'abord présentés. Ensuite, le simulateur de

6. DISCOVER-AQ : http://www.nasa.gov/mission_pages/discover-aq/index.html

scènes et les scènes à générer sont décrits. Les résultats obtenus sont alors illustrés à la fin de ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, l'état de l'art sur la caractérisation des panaches industriels est exploré. Les méthodes de détection de panaches, d'estimation des paramètres de fond atmosphériques et des propriétés de surface, ainsi que les méthodes de quantification des gaz sont alors comparées.

Lors du quatrième chapitre, nous présentons notre nouvelle méthodologie pour la caractérisation des panaches industriels. Les résultats des différentes étapes de cette méthode sont analysés.

Le chapitre 5 comporte, d'une part, une analyse des performances de notre méthode de caractérisation de panache, réalisée sur des images hyperspectrales de scènes synthétiques ; et d'autre part une application de cette méthode à une acquisition réelle d'une scène industrielle.

Enfin, le dernier chapitre conclue ce document, en rappelant les principaux résultats obtenus lors de nos travaux. Il est aussi l'occasion de proposer des perspectives d'études, susceptibles d'améliorer et de compléter les outils que nous avons développés.

Chapitre 1

Caractéristiques des panaches anthropiques

Sommaire

1.1	Introduction	7
1.2	Composition physico-chimique des panaches anthropiques	8
1.2.1	Inventaire des polluants d'intérêt	8
1.2.2	Réglementation régissant les émissions des sources industrielles	10
1.2.3	Concentration de polluants à la sortie de cheminées pour différentes industries	11
1.2.4	Cas de la pollution due à des catastrophes industrielles	15
1.3	Comportement radiatif des panaches anthropiques	16
1.3.1	Généralités	16
1.3.2	Transfert radiatif : formalisme et notations	17
1.3.3	Signature des gaz d'intérêt en infrarouge thermique	22
1.3.4	Impact radiatif d'un panache industriel : mise en équation	24
1.4	Conclusion	26

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons dans un premier temps à la composition générale des panaches industriels. Nous détaillerons l'inventaire des polluants les plus présents dans les rejets atmosphériques, et nous exposerons les réglementations sur les seuils d'émission de ces polluants. Ensuite, nous présenterons les émissions typiques des industries retenues pour la suite de l'étude. Dans un second temps, nous nous focaliserons sur le comportement radiatif des panaches industriels, en illustrant les différentes signatures optiques des gaz, puis en établissant les équations du transfert radiatif qui régissent le comportement électromagnétique de ces panaches.

1.2 Composition physico-chimique des panaches anthropiques

1.2.1 Inventaire des polluants d'intérêt

La composition des panaches émis par les usines dépend essentiellement du secteur d'activité et des procédés industriels appliqués. Il existe une grande variété dans les substances polluantes rejetées dans l'atmosphère par l'industrie. Nous allons, dans ce qui suit, présenter quelques uns de ces polluants en les regroupant par famille selon la réglementation en vigueur, leur caractéristiques physico-chimiques (COV, POP, aérosols PM) ou leurs effets.

Gaz importants

Nous allons nous intéresser, tout d'abord, aux gaz de grande importance lors de l'établissement des bilans de qualité de l'air. Ces gaz ont des effets néfastes sur la santé humaine, d'où l'importance d'étudier et de surveiller leur présence dans l'atmosphère. Les émissions de certains de ces gaz sont ainsi soumises à une réglementation européenne.

- **Le dioxyde de carbone (CO_2)** : est très connu pour son rôle dans le réchauffement climatique. La combustion fossile ou de biomasse est la principale source d'émission du CO_2 . Cette combustion se retrouve dans les industries, les transports ou le chauffage des foyers. Ce gaz est aussi émis naturellement lors des feux de forêts, des éruptions volcaniques et par la respiration des êtres vivants.
- **Le dioxyde de soufre (SO_2)** : est un gaz qui provient essentiellement de l'utilisation de combustibles fossiles soufrés (charbon, fioul, gazole, etc.). La production d'électricité et le raffinage de pétrole sont les secteurs qui émettent le plus de SO_2 . Ce gaz peut aussi être émis lors des feux de forêts, ou des éruptions volcaniques. Selon la durée d'exposition et les concentrations mises en jeu, ce gaz peut provoquer des problèmes sanitaires allant de la simple gêne respiratoire jusqu'à la mort par arrêt respiratoire. Il est aussi à l'origine des aérosols sulfatés.
- **les oxydes d'azote (NO_x)** : comprennent le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO_2) et le tétraoxyde d'azote (N_2O_4). Les principales sources d'émission des NO_x sont anthropiques, avec notamment la combustion fossile et les émissions des véhicules diesel. Ils ont aussi pour origine d'autres procédés industriels tels que la production d'acide nitrique ou la fabrication d'engrais. Les oxydes d'azote se forment aussi naturellement lors des orages ou des éruptions volcaniques.
- **L'ammoniac (NH_3)** : est un polluant surtout lié aux activités agricoles (rejets organiques de l'élevage) mais également induit par l'usage de voitures équipées d'un catalyseur.
- **Le monoxyde de carbone (CO)** : est émis après une combustion incomplète de combustibles ou de carburants. Aussi, on le retrouve dans les rejets des incinérateurs ou les pots

d'échappement des voitures.

- **Le protoxyde d'azote (N_2O)** : est le troisième gaz, en terme d'importance, impliqué dans le réchauffement climatique. Il est majoritairement émis par les activités agricoles, notamment avec l'utilisation des engrais. Le transport routier et certains procédés industriels émettent aussi du N_2O dans l'atmosphère.
- **L'hexafluorure de soufre (SF_6)** : est exclusivement synthétisé par voie chimique. On le retrouve dans plusieurs applications techniques : agent diélectrique et de coupure dans les équipements électriques, gaz protecteur pour les fonderies de magnésium. Ainsi, ce sont le secteur de production d'électricité et celui de la métallurgie du magnésium qui en émettent le plus dans l'atmosphère. Le SF_6 participe à l'effet de serre, avec un pouvoir de réchauffement global 23900 plus important que celui du CO_2 .
- **L'ozone (O_3)** : est un polluant secondaire produit par des réactions impliquant des NO_x ou certains COV, sous l'effet du rayonnement solaire.

Les Composés Organiques Volatils (COV)

La famille des composés organiques volatils (COV) regroupe une multitude de gaz, avec des caractéristiques très variables. Il s'agit (selon la directive 1999/13/CE du Conseil européen du 11 mars 1999) de gaz contenant au moins l'élément carbone ainsi que un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène, halogènes, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote. Souvent, le méthane (CH_4), naturellement présent dans l'atmosphère, est considéré comme un COV particulier. Ce qui amène à parler de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM).

On distingue plusieurs sous-familles de COV :

- les **alcane**s : propane (C_3H_8), butane (C_4H_{10}), pentane (C_5H_{12}), etc.
- les **alcène**s : butène (C_4H_8), pentène (C_5H_{10}), etc.
- les **diène**s et les **terpène**s : butadiène (C_4H_6), hexadiène (C_6H_8), etc.
- les **composés oxygénés** : aldéhydes, cétones, esters, alcool, etc.
- les **aromatiques mono ou polycycliques** : benzène (C_6H_6), toluène (C_7H_8), etc.

Parmi les aromatiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont particulièrement surveillés, du fait de leurs caractéristiques chimiques et toxicologiques. Ils sont souvent toxiques, mutagènes et/ou cancérogènes.

Les sources d'émission des COV sont très variées, elles peuvent impliquer des phénomènes de combustion, d'évaporation de solvants (présents dans les peintures, les encres, les colles, les détachants, les cosmétiques), d'évaporation des composés organiques (issue par exemple des carburants), ou des réactions biologiques. Le secteur résidentiel et la construction sont les secteurs d'activité qui émettent le plus de COV [10].

Les Produits Organiques Persistants (POP)

Cette famille regroupe plusieurs molécules organiques toxiques pour la santé (mutagènes et cancérigènes) et pour l'environnement. Elles sont persistantes dans l'atmosphère, du fait de leur résistance aux dégradations photolytique, biologique et chimique. Les POP se caractérisent par une solubilité élevée dans les lipides, ce qui entraîne leur bioaccumulation dans les tissus vivants. Leur quantité s'accroît tout au long de la chaîne alimentaire. En outre, ils sont semi-volatils et circulent sur des longues distances dans l'atmosphère avant leur dépôt dans des milieux froids [11].

Voici quelques exemples de ces produits organiques persistants : Trichloroéthylène (TRI), Trichloroéthane (TCE), Tetrachloroéthylène (PER), Dioxines et furanes (Diox), Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB) et Hexachlorobenzène (HCB).

Plusieurs procédés industriels sont mis en jeu lors des émissions des POP. Nous pouvons citer à titre d'exemple : la combustion des carburants ou de biomasse, fabrication et utilisation des pesticides, production d'électricité, métallurgie des métaux ferreux et incinération de déchets.

Les Aérosols

On désigne par aérosols, l'ensemble des particules liquides ou solides en suspension dans un milieu gazeux. Les aérosols constituent une famille qui couvre une très large gamme de dimensions allant de quelques dizaines de nanomètres à 10 micromètres. On les classe généralement ainsi :

- **PM 10** : particules dont le diamètre moyen est inférieur à 10 μm .
- **PM 2.5** : particules dont le diamètre moyen est inférieur à 2.5 μm .
- **PM 1.0** : particules dont le diamètre moyen est inférieur à 1 μm .
- **Ultra-fines / Nanoparticules** : particules dont le diamètre moyen est inférieur à 0.1 μm .

La composition chimique des aérosols est un deuxième paramètre qui permet de les classer. Dans un contexte industriel, les aérosols émis dans l'atmosphère sont essentiellement des sulfates, des nitrates, des suies, des particules organiques, et des particules métalliques [12] [13].

Les aérosols sont émis dans l'atmosphère par des sources très diverses. Les plus importantes en masse sont les chantiers de BTP, l'exploitation des carrières, les industries utilisant la combustion à partir des combustibles minéraux solides ou les combustibles/carburants liquides et de biomasse.

1.2.2 Réglementation régissant les émissions des sources industrielles

Nature des réglementations

Lorsqu'on parle de « réglementation » de la pollution atmosphérique, on fait référence aux directives européennes en matière de surveillance de la qualité de l'air. On distingue alors deux catégories de polluants soumis aux obligations réglementaires sur les valeurs seuils de concentration dans l'air ambiant à respecter [14] : les polluants soumis à une obligation de valeur limite, et ceux soumis à

une obligation de valeur cible.

Pour les polluants rentrant dans la première catégorie, la réglementation préconise un seuil de concentration maximal dans l'air ambiant à ne pas dépasser dans un délai déterminé. Des mesures de surveillance de ces polluants doivent être effectuées. Cette directive concerne les polluants suivants : le Dioxyde de soufre (SO_2), les Oxydes d'azote (NO_x), le Monoxyde de carbone (CO), les Particules en suspension (PM_{10}), le Plomb (Pb), et le Benzène (C_6H_6).

Quant aux polluants de la deuxième catégorie, un seuil de concentration maximal dans l'air ambiant doit être respecté. Mais la réglementation reste flexible sur le délai. Ce qui s'explique par des difficultés rencontrées lors de la mise en place des politiques de réduction de la pollution concernée. Les mesures de surveillance des valeurs cibles sont obligatoires. Voici les polluants de cette catégorie : l'Ozone (O_3), le Nickel (Ni), le Cadmium (Cd), l'Arsenic (As), et le Benzo(a)pyrène (BaP).

Présentation des seuils réglementaires pour différents polluants

Les deux tableaux 1.1 et 1.2 présentent pour les principaux polluants (gaz et aérosols), les différentes concentrations et seuils usuels. Les valeurs présentées dans ces deux tableaux sont issues pour la plupart des données de l'INERIS¹ et de l'ADEME².

Ces deux tableaux montrent que les seuils réglementaires varient beaucoup d'un polluant à un autre. Cette variabilité s'explique par les différences au niveau des impacts de ces derniers sur la santé et sur l'environnement, mais aussi par les concentrations de fond de ces polluants dans l'atmosphère.

1.2.3 Concentration de polluants à la sortie de cheminées pour différentes industries

Les émissions de gaz et d'aérosols dépendent beaucoup du type de l'industrie impliquée, à la fois en termes du type des gaz émis que des débits massiques mis en jeu. Afin de simuler des scènes industrielles typiques en terme de dispersion du panache de polluants, nous avons sélectionné trois industries différentes parmi les plus polluantes : les raffineries, les cimenteries et les incinérateurs de déchets. La première industrie a été choisie car nous disposons d'un jeu de données réelles d'une raffinerie au Québec. Par ailleurs, la présence d'une cimenterie et d'un incinérateur de déchets à proximité de Toulouse nous a poussé à choisir les deux autres industries.

Pour chacune de ces familles nous allons présenter les valeurs de quelques grandeurs caractéristiques des émissions, en particulier les concentrations des gaz en sortie de cheminée, (cf. [15], [16], [17]).

Raffinerie

Le raffinage du pétrole nécessite l'utilisation de plusieurs procédés physico-chimiques. Chacun de ces derniers génèrent des polluants différents émis dans l'atmosphère. Il est donc plus judicieux

1. INERIS : <http://www.ineris.fr>

2. ADEME : <http://www.ademe.fr>

Composés	Concentrations de fond	Seuils de concentrations recommandés ou d'alerte	Seuils réglementaires des concentrations en sortie d'usine	Impact
H ₂ O	Variable	-	-	Formation aérosols
SO ₂	1 à 30 ppbv	<ul style="list-style-type: none"> - 300 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (recommandation) - 500 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (alerte) 	<ul style="list-style-type: none"> - 1700 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (raffinerie) - 50 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (UIOM) (<i>circulaire Lepage</i>) 	Santé, écosystèmes, formation aérosols
CO	quelques ppm	10 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	50 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	Santé, effet de serre
N ₂ O	250 ppbv	Pas de réglementation	réglementation du flux émis : 7 kg/tonne d'acide nitrique produite	Santé, formation aérosols
O ₃	0 – 80 ppbv	<ul style="list-style-type: none"> - 180 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (recommandation) - 240 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (alerte) 	-	Santé, écosystèmes
NO ₂	quelques ppbv	<ul style="list-style-type: none"> - 200 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (recommandation) - 400 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (alerte) 	100 – 500 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (selon industrie pharmaceutique ou raffinerie)	Santé, précurseurs aérosols et O ₃
NO	quelques ppbv	-	100 – 500 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (selon industrie pharmaceutique ou raffinerie)	Santé, précurseurs aérosols et O ₃
NH ₃	quelques ppbv	pas de réglementation	17 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (soit 25 ppm) valeur d'exposition	Santé, formation aérosols
Formaldéhyde	< 1 ppbv	60 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	pas de réglementation	Santé, formation aérosols
Benzène	2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	2 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	Santé, formation aérosols
Familles de COV	quelques ppbv	Réglementation Benzène	110 à 150 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ selon la quantité de solvant utilisée	Santé, précurseurs aérosols et O ₃

TABLE 1.1: Tableau récapitulatif des seuils réglementaires pour les principaux composés atmosphériques gazeux d'intérêt (sources : INERIS, ADEME).

Aérosols : Taille	Concentrations de fond	Seuils des concentrations moyennes journalières	Seuils réglementaires des concentrations en sortie d'usine	Impact
PM 10	quelques dizaines de $\mu g \cdot m^{-3}$	$50 \mu g \cdot m^{-3}$	$10 mg \cdot m^{-3}$ au total (circulaire Lepage)	Santé
PM 2.5	quelques $\mu g \cdot m^{-3}$	$50 \mu g \cdot m^{-3}$	$10 mg \cdot m^{-3}$ au total (circulaire Lepage)	Santé
PM 1	quelques $\mu g \cdot m^{-3}$	$50 \mu g \cdot m^{-3}$	$10 mg \cdot m^{-3}$ au total (circulaire Lepage)	Santé

TABLE 1.2: Tableau récapitulatif des seuils réglementaires pour les différents types d'aérosols (sources : INERIS, ADEME).

de traiter séparément les différents segments d'une raffinerie :

Production d'énergie

Ce segment regroupe tous les systèmes de production d'énergie interne, nécessaire au fonctionnement de la raffinerie. Le tableau 1.3 regroupe les données sur les émissions dues à la production de l'énergie des raffineries.

Gaz	Unité	Gaz de raffinerie	Fioul lourd	Gaz brut	Gaz propre
CO	mg/m^3	40	20	50	10
NO _x	mg/m^3	150	550	800	100
SO ₃	mg/m^3			650	1
SO ₂	mg/m^3	150	700	6500	100
PM _{2.5}	mg/m^3	1	20	200	5
T°	°C			200	50
Volume « humide »	m^3/h			150000	200000

TABLE 1.3: Valeurs typiques des concentrations et autres données sur les fumées en sortie de cheminée des unités de production d'énergie des raffineries. (source : [15])

Craquage catalytique

Il s'agit d'un procédé qui permet de briser les grosses molécules d'hydrocarbures pour former des molécules plus petites, sous l'effet de la chaleur et d'un catalyseur. Le craquage catalytique produit une proportion de produits légers (essence) plus importante que d'autres procédés de conversion. Les unités de craquage catalytique peuvent représenter jusqu'à 40 % des particules émises par une raffinerie, 20 à 30 % des émissions de SO₂ et entre 15 et 30 % des NO_x. Le tableau 1.4 synthétise les concentrations des gaz émis par ce segment des raffineries.

Gaz	Unité	Valeur moyenne	Domaine
CO	mg/m^3	200	50 - 900
NO _x	mg/m^3	500	30 - 2000
SO ₂	mg/m^3	1000	200 - 4000
NH ₃	mg/m^3	10	NA
Aldehydes	mg/m^3	1	NA
PM _{2.5}	mg/m^3	1	10 - 1000
T°	°C	320	

TABLE 1.4: Valeurs typiques des concentrations et autres données sur les fumées en sortie de cheminée des unités de craquage catalytique (FCC) des raffineries. (source : [15])

Système de refroidissement

Dans une raffinerie, le refroidissement des flux de charge et des produits est nécessaire, afin de permettre un déroulement des différents procédés aux températures adéquates, et pour amener les produits à leur température de stockage nominale.

Les systèmes de refroidissement représentent une source importante dans les émissions d'hydrocarbures.

Gaz	Unité	Valeur moyenne	Domaine
COV	kg/h	20	10 - 100
Vapeur d'eau	kg/h	500000	

TABLE 1.5: Valeurs typiques des débits (en équivalent éthane pour les COV) sur les fumées en sortie de cheminée des unités de refroidissement des raffineries. (source : [15])

Stockage

Avant d'être transformés, le pétrole brut et les produits pétroliers intermédiaires sont stockés dans des réservoirs. De même les produits finaux connaissent une période de stockage avant d'être transférés vers l'extérieur de la raffinerie.

Le stockage est responsable d'émissions diffuses de certains hydrocarbures, qui viennent s'ajouter au bilan total des émissions de la raffinerie.

Cimenterie

Les cimenteries contribuent beaucoup aux émissions atmosphériques. En effet, la fabrication du clinker - constituant principal des ciments artificiels - exige de porter à une température de $1450^{\circ}C$ un mélange de calcaire et de silice. Cette température est atteinte par une combustion de combustibles fossiles (charbon, dérivées du pétrole, ...), ou de combustibles alternatifs moins polluants.

Le tableau 1.7 présente la valeur moyenne et la plage de variation des concentrations des principaux

Gaz	Unité	Valeur moyenne	Domaine
C_2H_6O	kg/h	300	0 - 500
C_2H_6	kg/h	1000	0 - 2000
C_2H_4	kg/h	200	0 - 500
C_3H_6	kg/h	150	0 - 300
NH_3	kg/h	350	0 - 500
C_6H_6	kg/h	NA	0 - 2

TABLE 1.6: Valeurs typiques des débits de fuites diffuses des unités de stockage des raffineries. (source : [15])

gaz émis par les cimenteries.

Gaz	Unité	Valeur moyenne	Domaine
NO_x	mg/m^3	500	100 - 2000
HF	mg/m^3	0.05	0.01 - 1
HCl	mg/m^3	5	0.02 - 20
CO	mg/m^3	500	200 - 2000
SO_2	mg/m^3	1000	100 - 2000
C_2H_6	mg/m^3	0	0
$PM_{2.5}$	mg/m^3	10	0.3 - 250

TABLE 1.7: Valeurs typiques des concentrations sur les fumées en sortie de cheminée des fours de cimenterie. (source : [16])

Incinérateur de déchets

L'incinération est un procédé utilisé dans le traitement d'une large gamme de déchets. Selon les déchets brûlés, différents gaz et particules sont produits, dont une partie est ensuite émise dans l'atmosphère.

La pollution atmosphérique des incinérateurs dépend essentiellement des déchets traités. En Europe, on distingue deux types d'incinérateurs : les incinérateurs municipaux qui traitent les ordures ménagères, et les incinérateurs industriels qui traitent les déchets dangereux. Par la suite nous nous focaliserons sur le premier type d'incinérateur.

Le tableau suivant illustre les valeurs typiques des émissions de certains gaz et particules pour les incinérateurs municipaux.

1.2.4 Cas de la pollution due à des catastrophes industrielles

Il est très difficile de définir un scénario typique pour modéliser les accidents industriels, car chaque accident est unique, à la fois en termes des composants relâchés dans l'atmosphère et en

Gaz	Unité	Valeur moyenne	Domaine
NO _x	mg/m ³	50	30 - 200
HF	mg/m ³	0.5	0.1 - 1
HCl	mg/m ³	1	0.1 - 1
CO	mg/m ³	50	1 - 100
SO ₂	mg/m ³	20	0.5 - 50
N ₂ O	mg/m ³	2	1 - 12
NH ₃	mg/m ³	1	0.5 - 3.5
C ₂ H ₆	mg/m ³	1	0.1 - 10
PM	mg/m ³	1	0.1 - 10

TABLE 1.8: Valeurs typiques des concentrations sur les fumées en sortie de cheminée des incinérateurs municipaux de déchets. (source : [17])

termes des concentrations mises en jeu.

En juin 2005, l'usine de pesticides du groupe SMB Formulation à Béziers subit un incendie généralisé de plusieurs bâtiments. Le feu est maîtrisé dix jours après son déclenchement. Durant cette période, environ 1700 tonnes de produits toxiques sont émis dans l'atmosphère. Le débit d'émission moyen lors de cet accident est de l'ordre de 7000 kg/h. Ce qui représente de 10 à 100 fois un débit d'émission canalisée d'un site industriel. Par la suite, nous considérerons que les émissions atmosphériques dans le cas d'une catastrophe industrielle sont de 10 à 100 fois plus importantes que les émissions du site en question lors de son fonctionnement nominal.

1.3 Comportement radiatif des panaches anthropiques

1.3.1 Généralités

Les propriétés optiques d'un gaz dépendent de la bande spectrale considérée. Ainsi, pour les faibles longueurs d'ondes, les molécules de gaz diffusent le rayonnement qu'elles reçoivent. Il s'agit de la diffusion de Rayleigh. Cette diffusion est en général indépendante de la composition des panaches ; elle dépend de la concentration totale des gaz. Le deuxième impact radiatif des gaz réside dans l'absorption d'une partie du rayonnement traversant le panache. Contrairement à la diffusion, l'absorption dépend de la nature des gaz présents et de leurs concentrations. Ce qui s'explique par le fait qu'une molécule de gaz absorbera une partie des photons aux longueurs d'onde spécifiques aux modes électroniques ou de vibrations ou de rotations des liaisons qu'elle comporte. Ainsi, chaque gaz possède des raies d'absorption caractéristiques des modes électroniques, vibrationnels et/ou rotationnels de ses liaisons intramoléculaires.

L'observation des raies d'absorption d'un gaz donné dans un spectre indique sa présence dans le champs de vue de l'instrument. L'amplitude de ces raies donne une information sur la concentration du gaz, car l'absorption est d'autant plus importante que la concentration du gaz est grande.

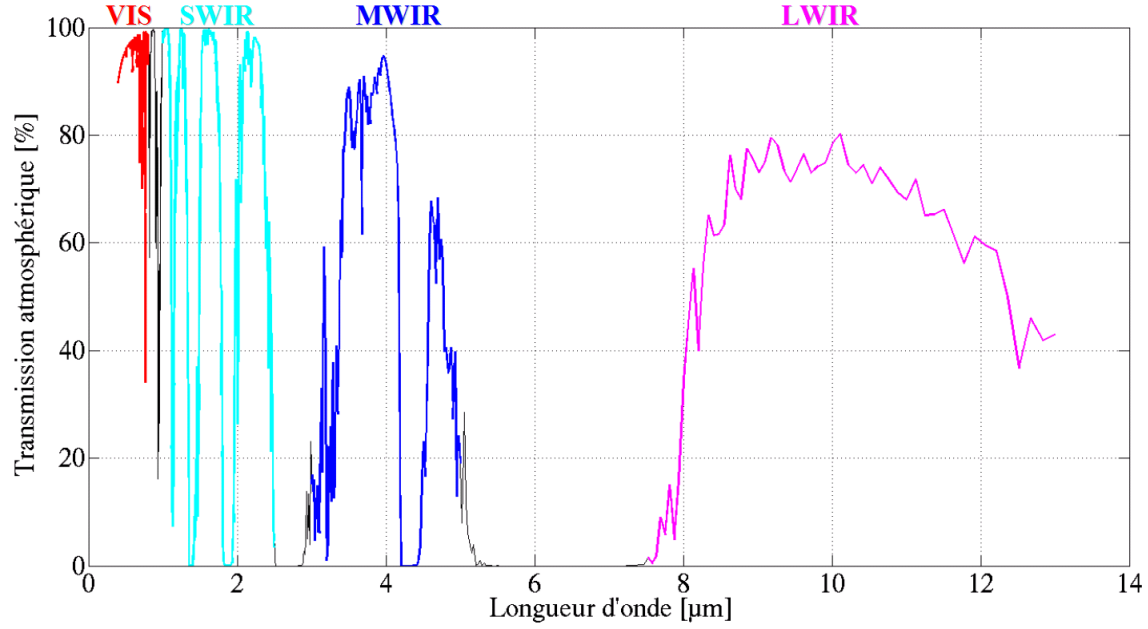


FIGURE 1.1 – Illustration des différentes fenêtres atmosphériques dans le domaine spectral $[0.4 - 13 \mu\text{m}]$. VIS : domaine du visible, SWIR : Short-Wavelength InfraRed, MWIR : Mid-Wavelength InfraRed, LWIR : Long-Wavelength InfraRed. Transmission atmosphérique au nadir pour une altitude de 3 km . Cette transmission atmosphérique a été calculée par l'outil MODTRAN (cf. §2.2.5).

Dans le domaine thermique (MWIR + LWIR), auquel nous nous intéresserons par la suite, lorsque la température du milieu est inférieure à celle du gaz, les molécules de ce dernier cèdent des photons aux mêmes longueurs d'onde que précédemment. On parle alors d'émission lorsque le gaz est plus chaud que son milieu environnant, et d'absorption lorsqu'il est plus froid.

1.3.2 Transfert radiatif : formalisme et notations

Variables spectrales

Le rayonnement est une onde électromagnétique, comportant à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence (f). Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale (cf. figure 1.2). Ces deux champs se propagent à la même vitesse (v). Dans le vide, la vitesse de propagation est égale à $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Une onde électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques :

- **La période** ($T [\text{s}]$) : représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle.
- **La fréquence** ($f [\text{Hz}]$) : inverse de la période, elle exprime le nombre de cycles par unité de temps.
- **La longueur d'onde** ($\lambda [\text{m}]$) : est une grandeur physique homogène à une longueur, caractéristique d'une onde monochromatique, définie comme la distance séparant deux crêtes

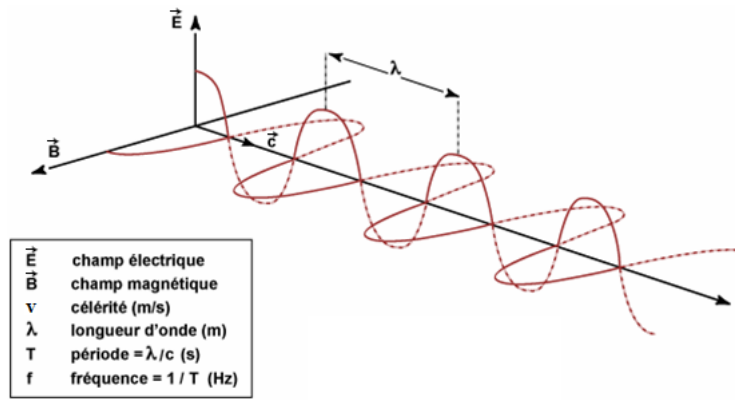


FIGURE 1.2 – Illustration d'une onde électromagnétique monochromatique, plane (source : [18]). Cette onde est caractérisée par sa période (T), sa fréquence (f), sa célérité (v) et sa longueur d'onde (λ).

successives (cf. figure 1.2). Elle est mesurée en mètre ou en l'un de ses sous-multiples. Par la suite, nous exprimerons systématiquement la longueur d'onde en micromètre (μm).

La longueur d'onde est reliée à la fréquence de l'onde par la relation suivante : $\lambda = \frac{c}{f}$.

- **Le nombre d'onde** ($\nu [cm^{-1}]$) : correspond au nombre d'oscillations de l'onde par unité de longueur (fréquence spatiale). Il est relié à la longueur d'onde par la relation suivante :

$$\nu [cm^{-1}] = \frac{10^4}{\lambda [\mu m]}.$$

Dans le présent document, nous utiliserons alternativement la longueur d'onde et le nombre d'onde.

Grandeurs énergétiques

Le tableau 1.9 présente les définitions, les expressions et les unités des principales grandeurs en jeu dans le transfert radiatif dans le domaine dit « thermique ».

Lors de notre travail, nous avons été amenés à utiliser essentiellement des luminances spectrales. Il s'agit, en effet, de la grandeur mesurée au niveau des capteurs. Elle s'exprime en $W/sr/m^2/\mu m$, ou en $W/sr/cm^2/cm^{-1}$ lorsqu'on travaille avec des nombres d'onde. Cette grandeur dépend de la bande spectrale du capteur (fenêtre étroite de longueurs d'onde).

Par abus de langage, le terme luminance désignera par la suite la luminance spectrale. De même, la composante de la luminance due à l'éclairement descendant au sol sera appelée éclairement descendant.

Propriétés optiques

Absorption

L'absorption est le processus physique transformant une partie de l'énergie électromagnétique en une autre forme d'énergie, lorsqu'elle traverse un corps donné. Il existe trois mécanismes d'absorption

Grandeur	Symbole	Définition	Expression	Unité
Énergie	Q		Q	J
Flux	ϕ	Quantité d'énergie rayonnée par une source dans tout l'espace, par unité de temps	$\phi = \frac{dQ}{dt}$	W
Éclairement	E	Flux énergétique reçu par un objet par unité de surface par unité de temps	$E = \frac{d\phi}{dS}$	$W \cdot m^{-2}$
Émittance	M	Flux énergétique émis par une source par unité de surface par unité de temps	$M = \frac{d\phi}{dS}$	$W \cdot m^{-2}$
Intensité	I	Énergie de rayonnement émise par unité de temps et par unité d'angle solide autour de la direction considérée	$I = \frac{d\phi}{d\Omega}$	$W \cdot sr^{-1}$
Luminance	L	Quantité d'énergie émise par unité de temps dans une direction donnée par unité de surface	$L = \frac{d\phi}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos\alpha}$	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$
Température de brillance	T_B	Pour une luminance spécifique $L(\lambda)$, la température de brillance est la température du corps noir qui émet la même luminance pour la longueur d'onde λ	cf. loi de Planck	K

TABLE 1.9: Tableau récapitulatif des grandeurs énergétiques dans le transfert radiatif thermique.

selon la longueur d'onde :

- Changement de la configuration électronique des atomes traversés par l'onde (UV + VIS + NIR),
- Vibration moléculaire (MWIR + LWIR),
- Rotation moléculaire (micro-ondes).

L'absorption est décrite par le coefficient d'absorbance $\alpha(\lambda)$ qui mesure la capacité d'un corps à absorber l'énergie qui le traverse. On a : $\alpha = \log(\frac{I_0}{I})$ avec I_0 l'intensité lumineuse qui atteint le corps, et I celle qui est transmise.

Émission - Loi de Planck

Tout corps ayant une température supérieure au zéro absolue (0 K) émet un rayonnement électromagnétique issu de l'agitation thermique de ses molécules. En outre, lorsqu'un corps reçoit un flux électromagnétique, une partie du rayonnement est absorbée. L'énergie interne du corps est modifiée, et on assiste à une production de chaleur qui sera ré-émise sous forme d'un rayonnement à une plus grande longueur d'onde.

Lors de l'équilibre thermodynamique toute l'énergie qu'absorbe un corps est ré-émise (1^{re} loi de Kirchoff). Cette hypothèse est valable dans l'atmosphère pour des altitudes comprises entre 0 et 50 km.

Lorsque tout le rayonnement reçu par un corps est absorbé, sans être réfléchi ni transmis, ce corps idéal est appelé *corps noir*. Planck a montré que l'énergie émise par un corps noir dépendait uniquement de sa température. Ainsi, la luminance émise par un corps noir à une température T en fonction de la longueur d'onde λ , est donnée par la formule suivante :

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \cdot (\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1)} = \frac{n_1}{\lambda^5 \cdot (\exp(\frac{n_2}{\lambda T}) - 1)} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}] \quad (1.1)$$

avec : $n_1 = 1.191 \cdot 10^8 [W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^4]$ et $n_2 = 14388 [\mu m \cdot K]$

L'inversion de cette formule permet de retrouver la température thermodynamique correspondante à une luminance donnée $L(\lambda)$, appelée température de brillance :

$$T_B(\lambda) = \frac{n_2}{\lambda \cdot \ln(1 + \frac{n_1}{\lambda^5 \cdot L(\lambda)})} \quad (1.2)$$

Pour la quasi totalité des corps et surfaces naturelles, une partie du rayonnement reçu est soit transmise soit réfléchi : on parle de *corps gris*. L'émission d'un tel corps est inférieure à celle d'un corps noir. On définit alors le coefficient d'émissivité $\epsilon(\lambda)$ d'un corps par le rapport entre l'énergie rayonnée par celui-ci et l'énergie qu'aurait rayonnée un corps noir à la même température.

Épaisseur optique / Transmission

L'épaisseur optique d'une couche atmosphérique est une grandeur sans unité, permettant d'évaluer le degré de transparence du milieu. Elle mesure la partie de l'énergie perdue par absorption et diffusion selon la relation suivante :

$$EO = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1.3)$$

où : EO est l'épaisseur optique, I_0 est l'intensité lumineuse émise par une source traversant un milieu et I est l'intensité de ce rayonnement à une profondeur donnée.

Une autre grandeur est aussi utilisée pour décrire la transparence du milieu : la transmission ou transmittance. La relation 1.4 permet de relier la transmission (τ) et l'épaisseur optique (EO) :

$$\tau(\%) = 100 \cdot e^{-EO} \quad (1.4)$$

La transparence de l'atmosphère est altérée par plusieurs facteurs comme la présence de nuages, d'aérosols mais aussi par les molécules de l'atmosphère elles-mêmes.

Réflexion

La réflexion est un phénomène physique, qui consiste en un changement de direction de propagation

d'une onde électromagnétique au niveau d'une interface entre deux milieux. Après réflexion, l'onde reste dans le milieu de propagation initial.

Selon la nature de l'interface, on peut rencontrer deux types de réflexion optique : spéculaire ou diffuse. Les lois de l'optique géométrique (Snell-Descartes) ne s'appliquent qu'à la réflexion spéculaire. La réflexion diffuse, intervient lorsque l'interface est rugueuse, et nécessite une modélisation plus complexe.

On définit le coefficient de réflexion (réflectance), noté $\rho(\lambda)$, comme étant le rapport entre l'énergie réfléchiée par une surface et l'énergie incidente reçue par cette même surface pour une longueur d'onde λ donnée.

Diffusion

La diffusion d'une onde survient lorsque celle-ci subit un changement de direction suite aux interactions avec des particules. On distingue 3 mécanismes de diffusion selon le ratio entre la longueur d'onde et la dimension des particules mises en jeu :

- **Diffusion de Rayleigh** : cette diffusion isotrope a lieu lorsque la longueur d'onde est très supérieure à la taille des éléments diffusants (cas des molécules de gaz). Elle est proportionnelle à $\frac{1}{\lambda^4}$, on peut donc la négliger pour l'IRT.
- **Diffusion de Mie** : Il s'agit d'une diffusion anisotrope ne dépendant pas de la longueur d'onde, on la rencontre quand la taille des éléments diffusants est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. C'est le cas pour les aérosols de taille micrométrique pour le domaine spectral de l'infrarouge thermique.
- **Diffusion non-sélective** : se produit lorsque la taille des particules est très grande par rapport à la longueur d'onde. Cette diffusion affecte toutes les longueurs d'onde.

Énoncé de la loi de Kirchhoff

La loi de Kirchhoff exprime le bilan d'énergie d'une surface recevant un rayonnement électromagnétique, elle s'écrit simplement :

$$\tau(\lambda) + \alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (1.5)$$

avec :

- L'absorption (α) : pourcentage d'énergie absorbée par la surface,
- La réflexion (ρ) : pourcentage d'énergie réfléchiée par la surface,
- La transmittance (τ) : pourcentage d'énergie transmise dans la surface.

Pour un *corps noir*, la totalité de l'énergie est absorbée : $\alpha(\lambda) = 1$ et $\tau(\lambda) = \rho(\lambda) = 0$.

Pour un *corps opaque*, il n'y a pas de transmittance : $\tau(\lambda) = 0$ et $\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$.

Enfin pour un *corps transparent*, on n'a pas de réflexion : $\rho(\lambda) = 0$ et $\alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$.

Loi de Beer-Lambert

La loi de *Beer-Lambert* permet d'exprimer la transmittance d'un panache donné en fonction des concentrations des composants de celui-ci par la relation suivante :

$$\tau(\lambda) = \exp\left(-\sum_i \kappa_i(\lambda) \cdot q_i\right) \quad (1.6)$$

où : q_i [ppmv · m] est la concentration du i^{me} gaz composant le panache, intégrée sur l'épaisseur du nuage. $\kappa_i(\lambda)$ est le coefficient d'absorption du i^{me} élément du panache en fonction de la longueur d'onde. Notons que cette relation n'est valable que pour le cas monochromatique. Ainsi, avec les résolutions spectrales des instruments existants cette relation n'est plus valable pour des couches hétérogènes : la transmission d'une couche hétérogène n'est pas égale au produit des transmissions de ses sous-couches homogènes.

Dans le cas où la couche de panache est considérée comme mince du point de vue optique ($\sum_i \kappa_i(\lambda) \cdot q_i \ll 1$), on peut approximer au premier ordre l'expression précédente par :

$$\tau(\lambda) = 1 - \sum_i \kappa_i(\lambda) \cdot q_i \quad (1.7)$$

Cette approximation reste valable à 5% d'erreur tant que $\sum_i \kappa_i(\lambda) \cdot q_i < 0.333$. Au-delà de cette valeur il nous faudra utiliser la formule 1.6 pour exprimer la transmittance du panache.

1.3.3 Signature des gaz d'intérêt en infrarouge thermique

Parmi les gaz d'intérêt pour nos différents scénarios, voici les composants principaux pour lesquels nous allons étudier les signatures optiques :

- o Le monoxyde de carbone (CO)
- o Le dioxyde de soufre (SO₂)
- o Les oxydes d'azote (NO_x) : le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂)
- o Le protoxyde d'azote (N₂O)
- o L'ammoniac (NH₃)
- o Le fluorure d'hydrogène (HF)
- o Le chlorure d'hydrogène (HCl)
- o L'éthane (C₂H₆)
- o Le Benzaldehyde (C₇H₆O)

Ces gaz ont pour la plupart une signature spectrale caractéristique dans les bandes MWIR (3 – 5 μm) et LWIR (7.5 – 12 μm) (cf. figure 1.3 et figure 1.4). Seuls le monoxyde d'azote (NO) a une signature dans la bande (5 – 5.5 μm) et le fluorure d'hydrogène (HF) signe dans la bande (2.33 – 2.86 μm). Par conséquent, hormis le NO et le HF, il est possible de caractériser l'ensemble des gaz d'intérêt, en étudiant leur signature dans les deux bandes MWIR et LWIR. Ces deux bandes

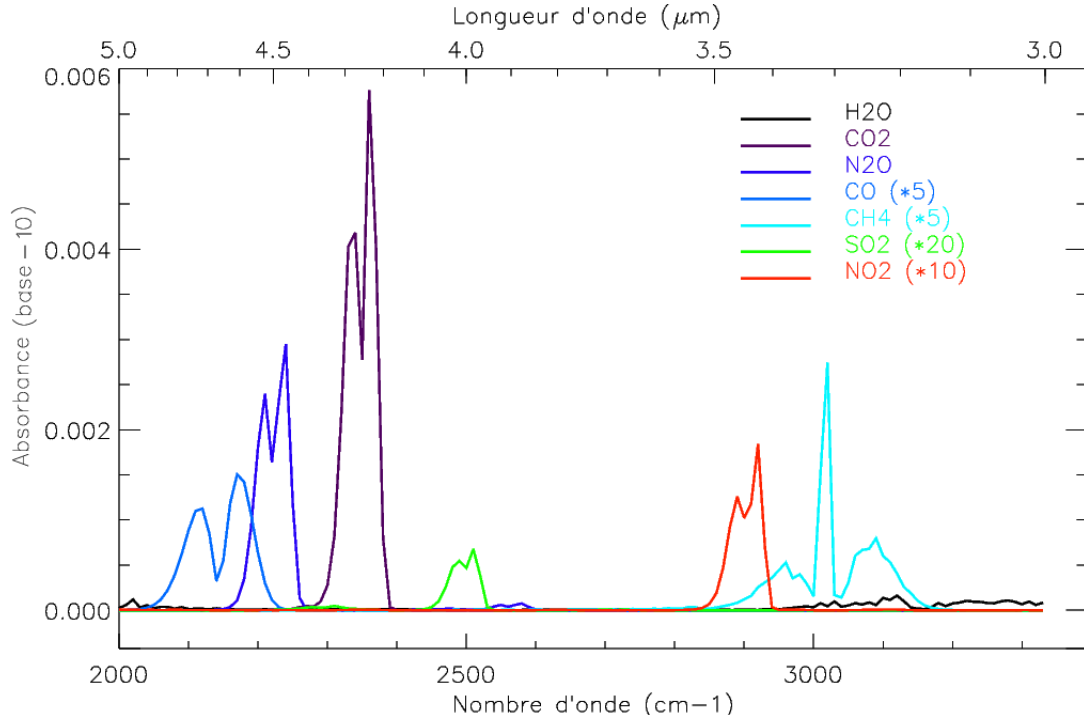


FIGURE 1.3 – Absorbances de quelques gaz d'intérêt dans la bande spectrale MWIR (3 – 5 μm). (source : données du *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL))

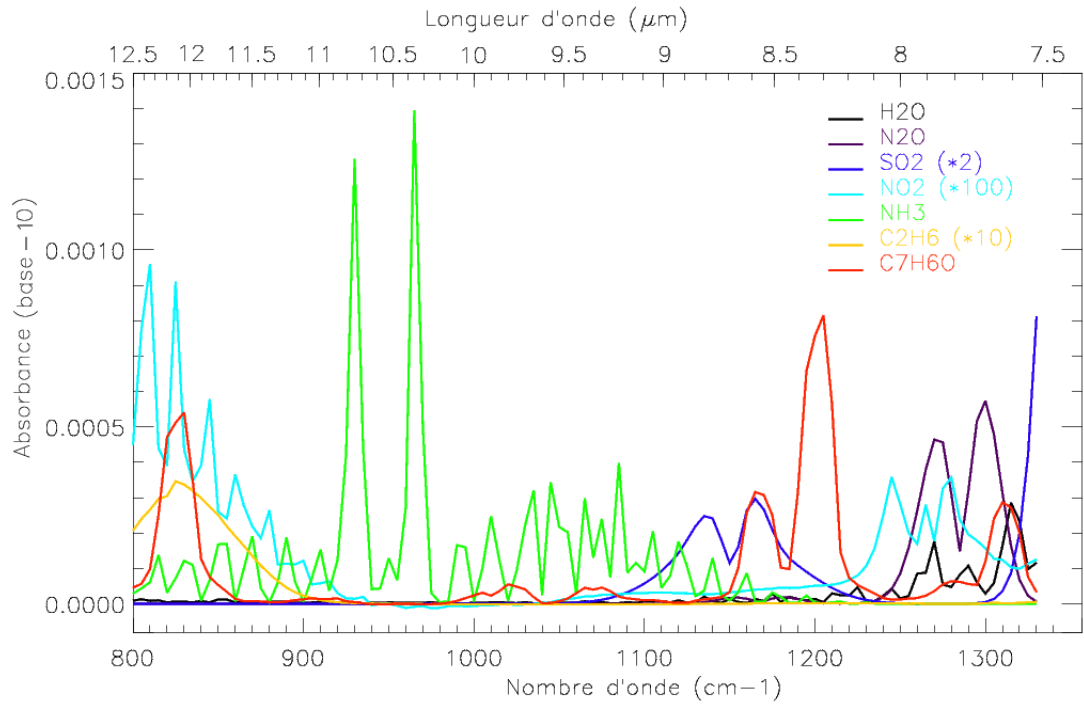


FIGURE 1.4 – Absorbances de quelques gaz d'intérêt dans la bande spectrale LWIR (7.5 – 12 μm). (source : données du PNNL)

sont d'autant plus intéressantes qu'elles représentent des fenêtres de transmission de l'atmosphère (cf. figure 1.1). Ce qui revient à dire que pour ces longueurs d'onde le rayonnement des basses couches atmosphériques n'est pas absorbé totalement par les autres couches.

La télédétection aéroportée dans ces bandes spectrales représente donc un bon moyen pour la caractérisation des émissions industrielles sélectionnées.

1.3.4 Impact radiatif d'un panache industriel : mise en équation

Hypothèses de modélisation

Les équations du transfert radiatif que nous allons écrire seront valables sous certaines conditions, que voici :

- On considérera des sols homogènes, plats et lambertiens (réfléchissant la lumière dans toutes les directions avec la même intensité) : ainsi, les effets de directionnalité du rayonnement réfléchi et les effets de l'environnement seront négligés.
- On modélisera le panache comme étant une couche plane, infinie, et homogène.
- Dans le domaine thermique $[7.5 - 13 \mu m]$, on négligera le rayonnement solaire devant les autres sources de rayonnement. De même, la diffusion des aérosols sera aussi négligée.

Expression générale de l'équation du transfert radiatif

La luminance en entrée d'un capteur aéroporté, issue d'une scène avec un panache, s'exprime dans le cas général ainsi [19] :

$$\begin{aligned}
 L_{\text{capteur}}(\lambda, T_{sfc}) &= L_{atm} + L_{sfc} + L_p \\
 &= \{L_{atm}^{sc}(\lambda) + L_p^{sc}(\lambda)\} + \{L_{atm}^e(\lambda) + L_p^e(\lambda)\} + L_{sfc}^{sc}(\lambda) + L_{sfc}^e(\lambda) \\
 &= L_{Sc}^{\uparrow}(\lambda) + L_{\epsilon}^{\uparrow}(\lambda) + \frac{E_{Sc, \epsilon}^{sfc}(\lambda)}{\pi} \frac{\rho_{sfc}(\lambda) \tau_{atm+p}(\lambda)}{1 - \rho_{sfc}(\lambda) A^{atm}(\lambda)} + \epsilon_{sfc}(\lambda) B(\lambda, T_{sfc}) \tau_{atm+p}(\lambda)
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

- L_{atm} : composante de la luminance due à l'atmosphère,
- L_{sfc} : composante de la luminance due au sol,
- L_p : composante de la luminance due au panache,
- L_{*}^{sc} : luminance due à la diffusion de l'atmosphère (*atm*), du panache (*p*) ou du sol (*sfc*),
- L_{*}^e : luminance due à l'émission thermique de l'atmosphère (*atm*), du panache (*p*) ou du sol (*sfc*),
- T_{sfc} : température du sol,
- ϵ_{sfc} émissivité du sol,
- ρ_{sfc} réflectivité du sol,
- $L_{Sc}^{\uparrow}(\lambda)$: luminance (atm + panache) montante due à la diffusion,
- $L_{\epsilon}^{\uparrow}(\lambda)$: luminance (atm + panache) montante due à l'émission thermique,

- $E_{Sc,\epsilon}^{sfc}(\lambda)$: éclaircissement arrivant au sol sans interaction avec celui-ci due à la diffusion et à l'émission thermique de l'atmosphère,
- τ_{atm+p} : transmission de l'atmosphère contenant un panache,
- A^{atm} : albédo sphérique de l'atmosphère.

Domaine thermique : $[7.5 - 13 \mu m]$

Dans l'infrarouge thermique $[7.5 - 13 \mu m]$, le rayonnement solaire est négligeable devant les autres sources et les phénomènes de diffusion peuvent être négligés. Par conséquent, les composantes du flux de rayonnement que reçoit un capteur aéroporté sont celles présentées dans le schéma ci-dessous.

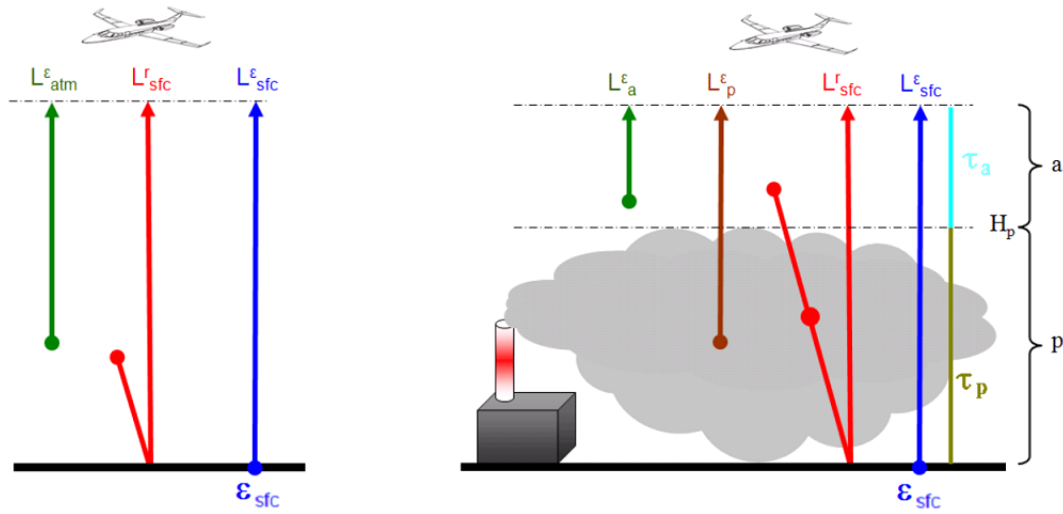


FIGURE 1.5 – Bilan radiatif dans le domaine thermique en absence (à gauche) et en présence (à droite) d'un panache.

En absence de panache

S'il n'y a pas de panache, la luminance en entrée du capteur s'écrit [19] :

$$L_{\text{capteur}}(\lambda, T_{sfc}) = L_{atm}^{\epsilon}(\lambda) + L_{sfc}^r(\lambda) + L_{sfc}^{\epsilon}(\lambda, T_{sfc}) \quad (1.9)$$

avec : L_{atm}^{ϵ} la luminance due aux émissions propres de l'atmosphère (émissions montantes de l'atmosphère), L_{sfc}^{ϵ} représente les émissions du sol à la température T_{sfc} et L_{sfc}^r correspond à la réflexion sur le sol des émissions thermiques descendantes.

En détaillant chacun des trois termes de l'équation 1.9, on obtient l'expression ci-dessous :

$$L_{\text{capteur}}(\lambda, T_{sfc}) = L_{atm}^{\epsilon}(\lambda) + (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot \frac{E_{sfc}^{\downarrow}}{\pi} \cdot \tau_{atm}(\lambda) + \epsilon_{sfc} \cdot B(\lambda, T_{sfc}) \cdot \tau_{atm}(\lambda) \quad (1.10)$$

Avec : E_{sfc}^{\downarrow} l'éclaircissement descendant au sol dû uniquement aux émissions thermiques de l'atmosphère. $B(\lambda, T_{sfc})$ est la fonction de Planck définie précédemment (cf. eq.1.1).

En présence de panache

La présence d'un panache introduit plusieurs modifications à l'équation de transfert que nous venons d'établir. D'une part, avec une température différente de celle de l'atmosphère (T_p) le panache émet un rayonnement thermique (L_p^ϵ). La présence du panache atténue aussi le rayonnement émis ou réfléchi par le sol, de même que celui descendant vers le sol, au niveau du capteur par la transmission (τ_p). En outre, il faut séparer l'atmosphère en deux zones : (a) au-dessus du panache et (p) à l'intérieur du panache. Le panache est ici supposé être une couche homogène, s'étendant du sol ($H = 0$) jusqu'à une altitude H_p . L'équation de transfert thermique s'écrit alors [19] :

$$\begin{aligned}
L_{\text{capteur}}(\lambda, T_{sfc}, T_p) &= L_{\text{atm}}^\epsilon(\lambda) + L_{sfc}^{refl}(\lambda) + L_{sfc}^\epsilon(\lambda, T_{sfc}) + L_p^\epsilon(\lambda, T_p) \\
&= L_a^\uparrow(\lambda) \\
&+ (1 - \epsilon_{sfc}(\lambda)) \cdot \frac{E_{sfc}^\downarrow}{\pi} \cdot \tau_p(\lambda) \tau_a(\lambda) \\
&+ \epsilon_{sfc}(\lambda) \cdot B(\lambda, T_{sfc}) \cdot \tau_p(\lambda) \tau_a(\lambda) \\
&+ (1 - \tau_p(\lambda)) \cdot B(\lambda, T_p) \cdot \tau_a(\lambda)
\end{aligned} \tag{1.11}$$

- L_a^\uparrow : luminance montante due à la couche a de l'atmosphère,
- τ_a : transmission de la couche a de l'atmosphère,
- τ_p : transmission de la couche du panache,
- T_p : température du panache,
- T_{sfc} : température du sol,
- ϵ_{sfc} : émissivité du sol,
- E_{sfc}^\downarrow : éclairement descendant au sol,

1.4 Conclusion

L'objectif de ce premier chapitre était de présenter l'objet de notre étude, à savoir les panaches industriels. Nous nous sommes intéressés dans un premier temps, à la composition physico-chimique de ces panaches de gaz. Un inventaire des gaz d'intérêt a été réalisé. Ensuite, la réglementation actuelle sur ces polluants et des exemples de bilan de pollution de certaines industries ont été présentés.

Dans un second temps, ce chapitre définit les notions de base de la physique du rayonnement ; avant d'établir les principales équations de transfert radiatif, qui seront utilisées par la suite.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous focaliser sur la génération des images hyperspectrales synthétiques des scènes industrielles contenant des panaches de gaz. Nous commencerons par présenter les différents outils et bases de données permettant cette génération de scènes. Puis, le simulateur des images hyperspectrales ainsi que les scènes industrielles typiques seront décrits. Enfin,

les résultats de notre simulateur seront discutés dans la dernière partie de ce deuxième chapitre.

Chapitre 2

Synthèse d'images hyperspectrales de scènes industrielles

Sommaire

2.1	Introduction	29
2.2	Outils pour la modélisation de scènes industrielles	32
2.2.1	Utilisation des bases de données de matériaux pour la modélisation du sol	32
2.2.2	Prise en compte de l'atmosphère sans panache	36
2.2.3	Modélisation de la dispersion des panaches industriels de gaz	36
2.2.4	Outil pour l'introduction du panache de gaz	42
2.2.5	Présentation des outils de transfert radiatif : performances et comparaison	45
2.3	Description du simulateur d'images hyperspectrales de scènes industrielles	54
2.3.1	Prise en compte du fond de la scène	55
2.3.2	Intégration du panache	56
2.3.3	Prise en compte des bruits de mesure	61
2.4	Description des scènes industrielles typiques	63
2.4.1	Raffinerie Jean Gaulin au Québec	63
2.4.2	Cimenterie de Boussens : <i>Scénario 2a (tab. 2.9)</i>	65
2.4.3	Incinérateur municipal de Toulouse : <i>Scénario 3 (tab. 2.10)</i>	67
2.4.4	Cas d'un accident : incendie d'une cimenterie : <i>Scénario 2b (tab. 2.11)</i>	68
2.5	Résultats et discussions	69
2.5.1	Atmosphère sans panache	69
2.5.2	Atmosphère en présence de panache	71
2.5.3	Génération des scènes synthétiques	74
2.6	Conclusion	78

2.1 Introduction

La validation des méthodes de détection et de caractérisation des panaches, nécessite la connaissance des vérités terrains des scènes traitées. Pour autant, les acquisitions hyperspectrales existantes ne fournissent pas toutes les données indispensables pour cette validation. D'où l'intérêt d'avoir un outil de synthèse d'images hyperspectrales de scènes industrielles observées par un capteur hyperspectral aéroporté.

Ce type d'outil a déjà été développé par certains laboratoires. Le plus abouti est DIRSIG¹ (*Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation*) du laboratoire RIT (*Rochester Institute of Technology*). Ce modèle peut générer des images monobandes, multispectrales ou hyperspectrales. Il couvre un large domaine spectral : du visible jusqu'à l'infrarouge thermique. DIRSIG dispose aussi de fonctionnalités pour l'imagerie LIDAR et RADAR. Bien que cet outil ne soit pas proposé en accès libre, plusieurs travaux sur la détection et la caractérisation des panaches de pollution industrielle ont recouru à DIRSIG pour valider leur méthodes. Ainsi, Messinger [20] utilise des images hyperspectrales obtenues par DIRSIG pour établir une comparaison entre trois méthodes différentes de détection de panaches. Les images utilisées sont basées sur l'image synthétique *MegaScene* [21]. Il s'agit d'une image couvrant une large zone spatiale générée par DIRSIG. Elle contient plus de mille matériaux différents, dont chacun a été modélisé à partir des mesures terrain de certaines propriétés physiques telle que l'émissivité.

D'autre part, *Turcotte et al.* [22] valident leur méthode de caractérisation de panache en utilisant une image générée par DIRSIG (cf. figure 2.1) contenant un panache de Freon-134a.

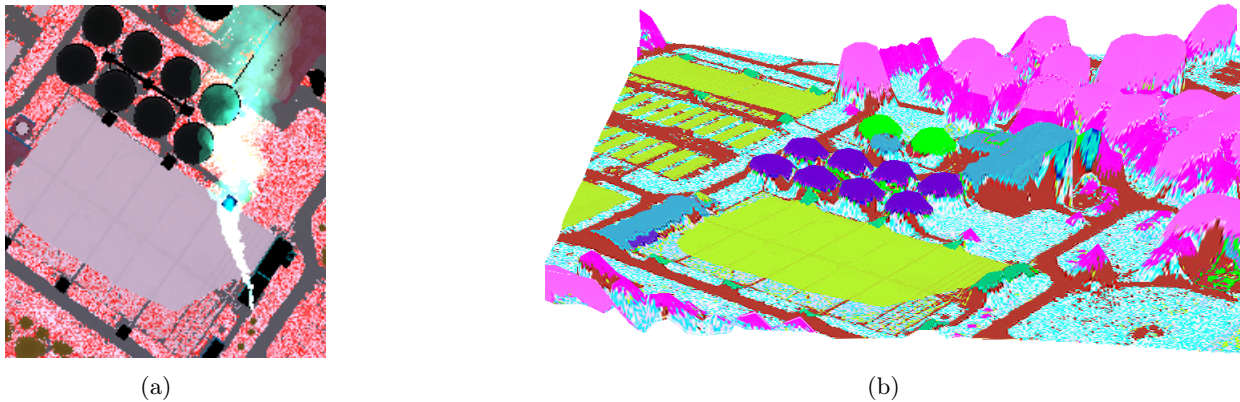


FIGURE 2.1 – Scène industrielle générée par DIRSIG et utilisée par *Turcotte et al.* [22] pour la validation de leur méthode de quantification de panache. (a) : image RGB composée des trois bandes 8.9, 10.4 et 11.9 μm où le panache de gaz (Freon-134a) est identifiable, (b) : illustration de la variabilité de la hauteur des différents objets de la scène, le rendu en fausses couleurs est basé sur les matériaux du sol.

Il existe aussi un autre code de génération d'images hyperspectrales assez répandu dans la littérature nommé IR-SAGE [23] (*The InfraRed Systems Analysis in General Environments*). Ce code vise à une prise en compte réaliste des différentes sources de bruit et de variabilité du signal reçu en entrée de capteur. Aussi, il intègre le bruit instrumental, la variabilité du sol (variations de l'émissivité et la température du sol), la variabilité atmosphérique (fluctuations de la transmission atmosphérique et de la luminance atmosphérique), de même que la variabilité de la concentration des gaz composant le panache.

1. DIRSIG : <http://www.dirsig.org/>

Pour étudier l'impact du contraste de la température et de l'émissivité du sol sur la détection de panache *Walsh et al.* [24] emploient une image hyperspectrale simulée par le code IR-SAGE. L'image en question est le résultat d'une combinaison d'un sol composé de trois matériaux différents (brique, neige et tubes en Acier-Cuivre) et d'un panache de Tétrachlorométhane (CCl_4) et de Tétrafluorure de silicium (SiF_4) à six concentrations différentes. L'image obtenue ne présente pas de cohérence spatiale entre les pixels adjacents, car l'intérêt pour les auteurs se résume à l'étude de l'impact de la variabilité des différents paramètres.

Dans leur travaux récents sur la quantification de gaz, *Niu et al.* [25] détaillent un nouveau processus de simulation de panache pour valider leur méthode. Tout d'abord, une image hyperspectrale sans panache est acquise à partir de vraies mesures. Ensuite, un panache de gaz est introduit, en rajoutant sa contribution radiative au signal sans panache. Dans un premier temps, un panache avec une concentration constante a été introduit afin d'étudier les performances de la quantification. Dans un second temps, un gaz avec une distribution gaussienne de concentration a été introduit à l'image sans panache, pour simuler une situation plus réaliste.

Cette approche souffre de deux limitations principales : d'une part, il y a une absence de maîtrise des paramètres de l'image sans panache (émissivité et température du sol, température et composition de l'atmosphère, ...). D'autre part, le panache est modélisé par une simple couche homogène, ce qui induit une erreur significative, dès lors que le panache s'étale verticalement sur une certaine épaisseur.

Étant donné nos contraintes que nous détaillerons par la suite et l'impossibilité d'avoir recours à des outils de simulation de scènes aussi performants que DIRSIG, nous avons dû mettre en place notre propre outil de génération d'images hyperspectrales pour modéliser les scènes industrielles.

L'objectif était pour nous de pouvoir générer une image hyperspectrale d'une scène industrielle, tout en répondant aux contraintes suivantes :

- Nécessité de modéliser une scène complexe, reproduisant un paysage industriel caractérisé par une forte variabilité spatiale du fait de l'hétérogénéité des matériaux composant la scène.
- Possibilité d'intégration d'un (ou de plusieurs) panache(s) de gaz polluant(s). Ces panaches sont alors décrits par une représentation 3D, afin d'améliorer la qualité du signal obtenu en entrée du capteur.
- Couverture des bandes MWIR ($3 - 5 \mu\text{m}$) et LWIR ($7.5 - 12.5 \mu\text{m}$) du domaine spectral infrarouge thermique.
- Simulation des images synthétiques dans un temps raisonnable.

La démarche suivie pour la génération des images hyperspectrales de scènes industrielles est illustrée dans le diagramme de la figure 2.2. Elle consiste à définir pour chaque pixel, un jeu de

données pour le sol, l'atmosphère et le panache. Ensuite, un calcul de transfert radiatif est réalisé afin de déterminer le signal en entrée du capteur.

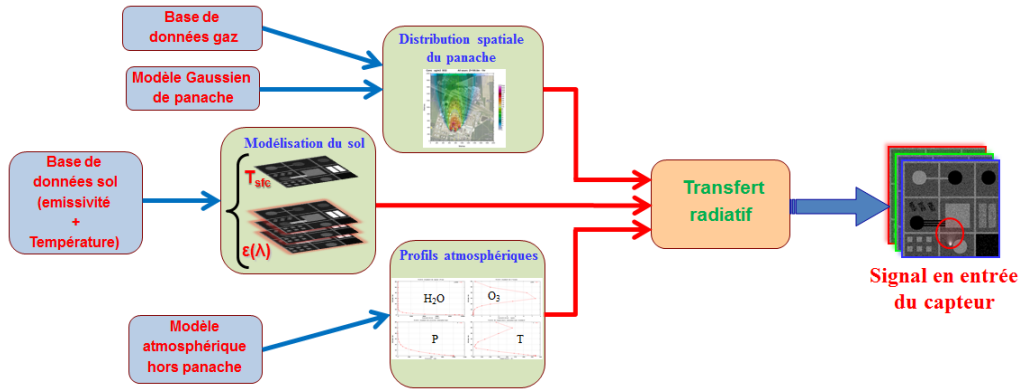


FIGURE 2.2 – Diagramme illustrant la démarche générale adoptée pour la génération des images hyperspectrales de scènes industrielles.

Afin d'attribuer les différentes caractéristiques du sol (température et émissivité), celles de l'atmosphère (température, pression, composition) et celles du panache (composition et température) plusieurs outils et bases de données ont été employés. Nous commencerons donc par introduire ces derniers. Ensuite, nous détaillerons notre démarche pour produire les images hyperspectrales. Puis, nous décrirons les scènes industrielles typiques que nous avons sélectionnées. Enfin, nous présenterons les résultats obtenus.

2.2 Outils pour la modélisation de scènes industrielles

Dans cette section, nous allons présenter les différents outils et bases de données nécessaires à la synthèse d'une scène industrielle.

2.2.1 Utilisation des bases de données de matériaux pour la modélisation du sol

Une scène industrielle est spatialement très hétérogène : elle contient une grande variété de matériaux, parmi lesquels nous pouvons citer : l'asphalte, l'aluminium, le cuivre, le sable, les briques rouges, le gazon, ... Ces matériaux sont présents dans la scène au sein de structures assez homogènes (routes, bâtiments, réservoirs, conduits, etc).

La première étape de l'intégration du sol dans notre modèle de simulation de scène, consiste à définir la géométrie 2D des différentes structures de cette scène. Pour des raisons de simplicité, nous n'avons pas retenu un modèle 3D de la scène. Néanmoins, les effets d'une structure 3D sur les grandeurs physiques seront intégrés dans la modélisation de ces grandeurs. À titre d'exemple nous pouvons citer les effets de l'ombre sur la température du sol. La deuxième étape consiste à attribuer à chaque structure le matériau qui la compose. Puis d'affecter à chaque matériau de la

scène les grandeurs physiques le modélisant. Deux grandeurs physiques sont nécessaires pour la prise en compte du sol lors de la simulation de scènes : la température de la surface (T_{sfc}) et son émissivité (ϵ_{sfc}). En effet, l'expression du rayonnement émis par la surface du sol ($\epsilon_{sfc} \cdot B(T_{sfc})$) fait intervenir ces deux grandeurs (cf. Eq.1.9).

Ainsi c'est à ce stade que nous associons pour chaque pixel du sol sa température et son émissivité, en tenant compte de la classe de matériau qui le compose. Nous allons expliquer dans ce qui suit comment cette association est réalisée.

Prise en compte de la température de surface

La température de surface est une donnée qui varie beaucoup selon les conditions météorologiques, la composition du sol, l'orientation des surfaces et le relief de la scène (effet d'ombre). Il est donc très difficile d'avoir une estimation réaliste de cette grandeur.

Nous avons donc opté pour une modélisation gaussienne de la température de surface au sein de chaque structure homogène. Les valeurs moyennes ont été fixées en tenant compte du matériau en question. Pour certains matériaux, nous nous sommes inspirés de mesures acquises lors de la campagne CAPITOUL [26]. Quant aux écart-types, nous avons fixé les valeurs en conformité avec les résultats présentés par Voogt [27].

Les valeurs des températures moyennes et des écarts types des différents matériaux sont présentés dans le tableau 2.1 :

Matériau	Température moyenne (en K)		Écart type (en K)	
	Printemps	Été	Printemps	Été
Terreau sablonneux marron	282	300	1	1
Route asphalte	287	305	2	2
Brique rouge	288	306	1	1
Peinture verte olive	288	306	1	1
Toiture en aluminium érodé	295	313	2	2
Pavé en ciment	287	305	2	2
Ardoise	289	307	2	2
Métal cuivre 10 ans	297	315	3	3
Acier galvanisé oxydé	297	315	3	3
Gazon	274	292	2	2

TABLE 2.1: Valeurs des températures moyennes et écart-types pour chaque classe de matériaux.

Prise en compte de l'émissivité du sol

Pour prendre en compte l'émissivité du sol dans notre modèle, nous avons utilisé les données de la bibliothèque ASTER v2 (cf. [28]). Cette base de données du JPL² (*Jet Propulsion Laboratory*)

2. JPL : <http://www.jpl.nasa.gov/>

englobe 2300 spectres de matériaux, regroupés par familles dans différentes librairies (matériaux artificiels, minéraux, roches, sols terrestres, végétations, matériaux lunaires, météorites, neige et glace, eau).

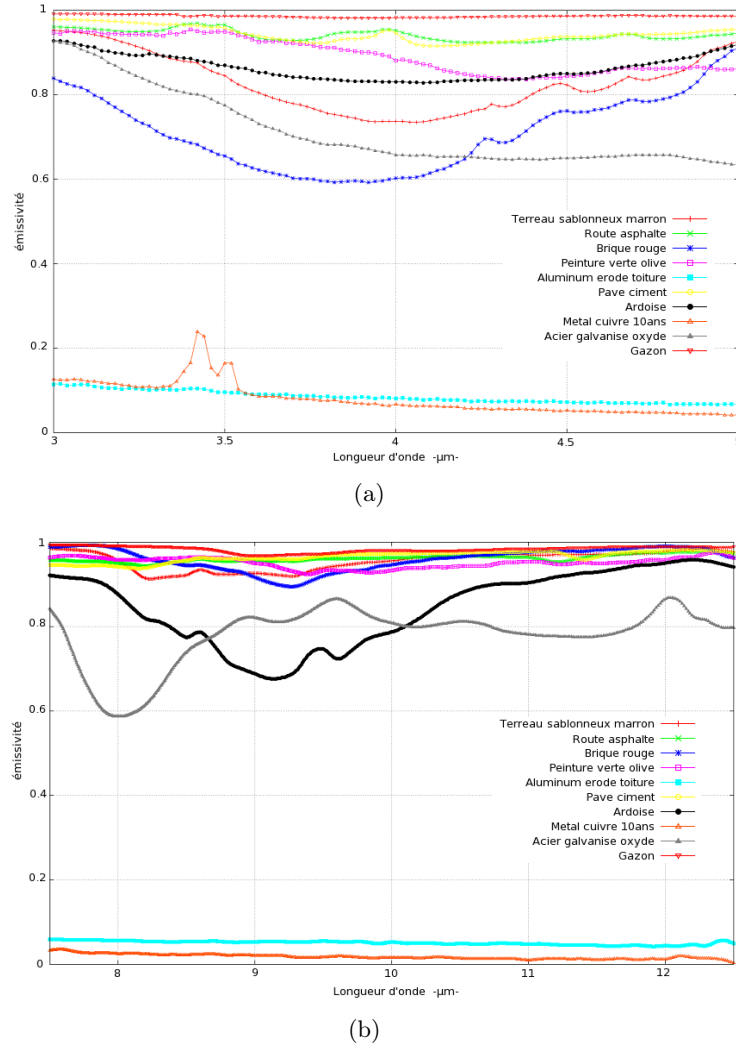


FIGURE 2.3 – Comparaison des émissivités, issues de la base de données ASTER (mesures en laboratoire), des quelques matériaux utilisés dans la synthèse de scènes industrielles, dans la bande spectrale MWIR (a), et la bande LWIR (b).

Les spectres, en réflectance, de cette librairie couvrent la bande spectrale $[0.4 - 15.4 \mu m]$, avec une résolution de $0.01 \mu m$. Ces données ont été acquises par plusieurs laboratoires, utilisant différents instruments : Nicolet, Perkin, Beckman, Perkin [28].

Sur la Figure 2.3 nous avons représenté les émissivités des matériaux utilisés dans nos simulations, dans les bandes MWIR et LWIR.

De même que la température de surface, l'émissivité du sol est une grandeur très difficile à modéliser de manière réaliste. Non seulement elle varie d'un matériau à un autre ; mais elle dépend aussi

de l'état physico-chimique du matériau (humidité, contamination par d'autres matériaux, fissures, ...). La figure 2.4 (cf. [29]) illustre très bien cette dépendance de l'émissivité par rapport à l'état du matériau. Dans cette situation un sol en asphalte a été recouvert par du sable avec différentes épaisseurs.

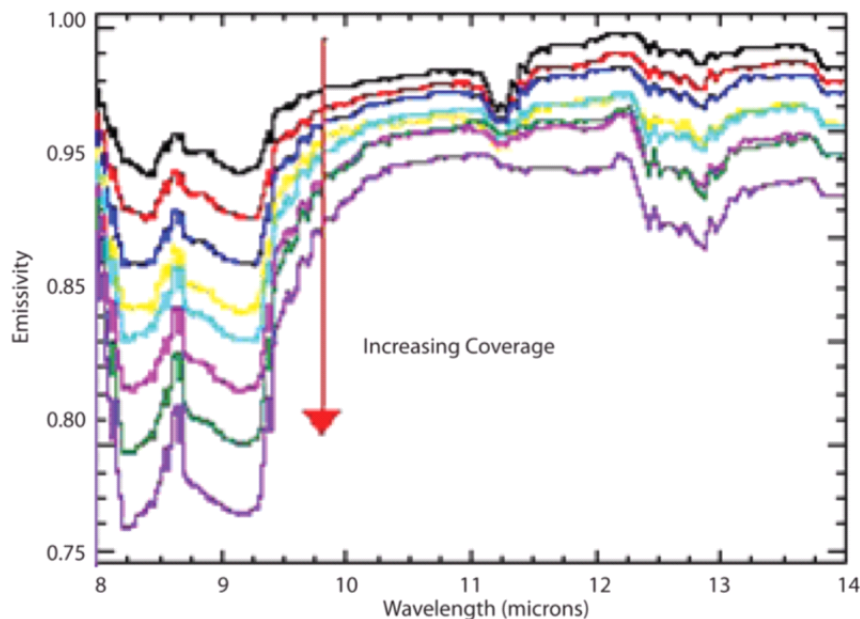


FIGURE 2.4 – Émissivités spectrales de plusieurs sols constitués d'asphalte recouverts par du sable à différentes épaisseurs. La flèche rouge indique le sens croissant des épaisseurs des couches de sable. Les mesures d'émissivité présentées ici ont été réalisées sur un terrain en asphalte, sur lequel les couches de sable ont été déposées. (cf.[29])

Il est donc indispensable de tenir compte de la variabilité intra-classe des émissivités provenant de la base ASTER. Comme pour la température de surface, nous avons introduit un bruit gaussien centré sur l'émissivité ASTER des matériaux utilisés. Le choix des écart-types est assez délicat. Il dépend essentiellement du matériau et de la longueur d'onde considérée, comme l'ont souligné *Mira et al.* dans leur étude sur l'influence de l'humidité du sol sur son émissivité [30]. Dans cette étude, ils ont comparé les émissivités de six échantillons de sols différents à plusieurs degrés d'humidité. Ils ont observé que la variabilité des émissivités restait comprise dans l'intervalle [1.7 %, 16 %] pour tous les matériaux et à toutes les longueurs d'ondes utilisés.

Dans le même registre, *Lesaignoux et al.* [31] avancent des chiffres similaires pour l'influence de l'humidité des sols sur la réflectance de ces derniers. Ainsi, dans la bande MWIR la différence absolue en réflectance ne dépasse pas 17 % (± 5 %) quel que soit le taux d'humidité du sol. Pour la bande LWIR, cette valeur ne dépasse pas 5 % (± 1 %). En moyenne la différence en réflectance atteint 2 % pour les taux d'humidité les plus défavorables.

Par la suite, lorsque nous introduirons un bruit sur les émissivités, nous le prendrons avec un écart-type égale à 1 %, en conformité avec les écarts-types de l'étude de *Lesaignoux et al.*.

2.2.2 Prise en compte de l'atmosphère sans panache

Étant donné les dimensions relativement petites des scènes traitées, les conditions atmosphériques sont considérées comme étant identiques d'un pixel à un autre. L'atmosphère est ainsi décrite par les profils de température, de pression et de concentration des différents gaz atmosphériques identiques sur toute la scène.

Plusieurs approches peuvent nous permettre de choisir le profil atmosphérique pour notre modèle. D'abord, il est possible d'utiliser des radiosondages réalisés régulièrement par le CNRM (*Centre National de Recherches Météorologiques*) pour le suivi météorologique. Ces radiosondages donnent pour un lieu donné les profils verticaux de température, pression et d'humidité. Ils seront complétés pour avoir la distribution verticale des gaz atmosphériques (en particulier le dioxyde de carbone et l'ozone).

Par ailleurs, le profil atmosphérique peut être sélectionné à partir de la base de données du LMD (*Laboratoire de Météorologie Dynamique*), nommée TIGR (*Thermodynamic Initial Guess Retrieval*³). Cette librairie climatologique contient 2311 profils atmosphériques représentatifs, sélectionnés par une méthode statistique à partir de 80,000 radiosondages. Chaque profil atmosphérique est décrit par les profils verticaux de la température, pression, vapeur d'eau et concentration d'ozone.

Une autre possibilité est d'utiliser un modèle empirique paramétré de la distribution verticale de la température, pression, vapeur d'eau et ozone, comme celui que nous avons considéré dans la section 2.2.5.

Enfin, il existe des modèles d'inversion atmosphérique permettant de retrouver les différents profils atmosphériques à partir des mesures satellites (cf. [32], [33] et [34]). Il est donc envisageable d'utiliser les sorties de ces algorithmes comme profils atmosphériques pour notre modèle.

2.2.3 Modélisation de la dispersion des panaches industriels de gaz

La dispersion des polluants industriels dans l'atmosphère comporte trois phases successives. D'abord, ces polluants sont rejetés au niveau des sites industriels, ensuite ils sont transportés dans l'atmosphère par le vent avant de se transformer en une autre espèce chimique, s'accumuler ou se diluer dans l'atmosphère. Dans cette partie nous allons nous intéresser à la modélisation des panaches industriels. Ce qui revient à étudier le transport des polluants au voisinage des sources d'émission.

La modélisation du transport de matière au sein d'un fluide par celui-ci, vise à déterminer les

3. TIGR : <http://ara.abct.lmd.polytechnique.fr/index.php?page=tigr>

concentrations locales des différents composants. Pour cela deux processus de transport de matière doivent être considérés :

- **La diffusion moléculaire** [35] : il s’agit d’un processus irréversible basé sur la loi de Fick. Cette loi stipule qu’une substance dans un mélange a tendance à uniformiser sa répartition. Ce qui implique la formation d’un flux des zones de forte concentration vers les zones de faible concentration.
- **L’advection** [36] : due au transport par l’écoulement moyen : il s’agit d’un phénomène réversible permettant le déplacement du polluant. Ce déplacement est isochore et conserve les concentrations, seule la forme du panache est affectée.

Ces deux phénomènes sont mis en équation (équation d’advection-diffusion). La résolution de cette équation permet de modéliser la dispersion atmosphérique des polluants. Le cas le plus simple est celui de la dispersion à partir d’une source ponctuelle, dans une atmosphère sans perturbation et sur un sol plat. Des phénomènes, comme les conditions météorologiques (pression, température, humidité, vitesse de vent, etc.), la stratification thermique, la nature et les conditions initiales des rejets, l’impact du relief et des bâtiments et les phénomènes de déposition, rendent le comportement du panache plus complexe [37]. Dans notre cas, certaines de ces perturbations seront considérées telles que les conditions météorologiques, ainsi que la nature et les conditions initiales des rejets. D’autres perturbations, tel que l’effet du relief, sont assez compliquées à modéliser ; elles n’ont pas été prises en compte dans notre modèle.

Il existe plusieurs approches de résolution de l’équation d’advection-diffusion [36]. Ces approches ne modélisent pas de la même manière les différents phénomènes perturbateurs. Ce qui induit des performances inégales en terme de qualité des résultats et de temps de calcul.

Les modèles gaussiens [37], [36] :

Ces modèles font appel à des solutions analytiques de l’équation d’advection-diffusion. Selon la modélisation de la source des émissions, on distingue les modèles de panache gaussien (source ponctuelle continue de débit massique constant) et les modèles à bouffées gaussiennes (bouffées ponctuelles émises sur des intervalles de temps successifs où chaque bouffée évolue indépendamment des autres selon un modèle gaussien).

Ces modèles intègrent les processus de dispersion et les processus physico-chimiques à l’aide de paramétrisations spécifiques afin d’échapper à la résolution des équations d’advection-diffusion. Ce qui implique un temps de calcul réduit (de l’ordre de quelques secondes par scénario pour des échelles kilométriques). Par conséquent, ils sont bien adaptés à des études opérationnelles (calcul en temps réel, étude d’impact).

Il existe différents outils développés dans la littérature afin d'intégrer un modèle gaussien pour le calcul de la dispersion atmosphérique des polluants. Nous pouvons citer à titre d'exemples : ADMS (*Atmospheric Dispersion Modelling System*) [38], ARIA Impact⁴. Une comparaison entre ces deux logiciels est proposée dans le rapport [39] réalisé par un groupe de travail pour l'Institut de veille sanitaire. Cette étude comparative met en évidence les différences de résultats observées entre ces deux logiciels pour deux scénarios de modélisation. En effet, bien que ces deux outils se basent sur la même approche de modélisation de la dispersion atmosphérique, ils n'utilisent pas le même type de paramétrisation. Ainsi, la turbulence atmosphérique est décrite par ARIA Impact sous forme de classes de stabilité (type classe de Pasquill cf. le tableau 2.2) en fonction du moment de la journée et des conditions météorologiques; tandis que ADMS prend en compte la turbulence par un calcul analytique de la hauteur de la couche limite et une description continue des propriétés de cette couche.

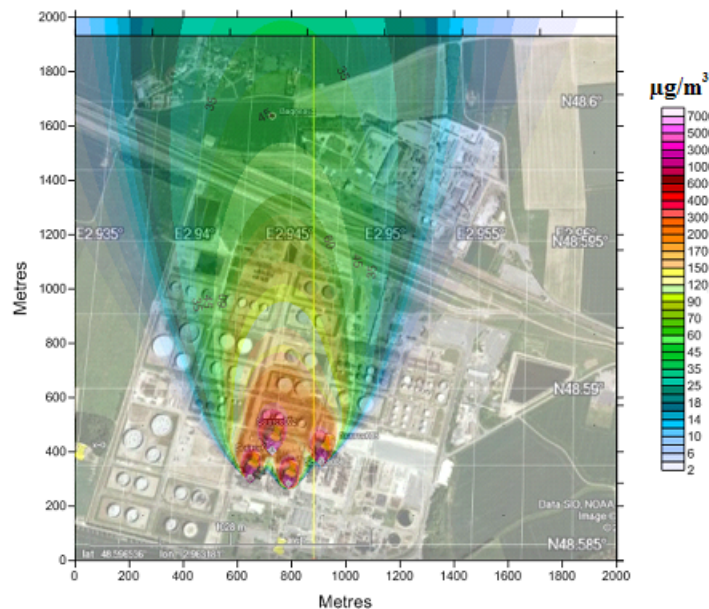


FIGURE 2.5 – Exemple d'utilisation du modèle gaussien sur la raffinerie Total de Grandpuits : Résultat obtenu avec le logiciel ADMS [38] pour des émissions de SO_2 . Sur cette scène les quatre cheminées de la raffinerie ont été simulées avec une hauteur de 90 m et un débit d'émission de 19.977 g/s. Lors de la simulation un vent de sud a été introduit avec une vitesse de 2 m/s.

La figure 2.5 illustre un exemple d'utilisation du modèle gaussien pour le calcul des rejets dans l'atmosphère de la raffinerie Total de Grandpuits. Les résultats ont été obtenus en utilisant le logiciel de modélisation de la dispersion atmosphérique ADMS. La simulation réalisée est basée sur les données du registre français des émissions polluantes IREP⁵, qui stipule des émissions annuelles

4. ARIA Impact : http://www.aria.fr/aria_impact.php

5. IREP : <http://www.pollutionsindustrielles.ecologie.gouv.fr/IREP/>

de 2520000 kg pour le SO_2 . Les quatre cheminées d'une hauteur de 90 m de la raffinerie ont été simulées ; ce qui représente pour chaque cheminée une émission de 19.977 g/s de SO_2 .

Les modèles lagrangiens [37], [36] :

Ces modèles sont basés sur le calcul des trajectoires turbulentes d'un grand nombre de particules de polluants au sein du panache. Un calcul du champs de vent dans lequel s'effectue la dispersion est nécessaire en entrée de ces modèles : en général, ils sont couplés avec un modèle eulérien effectuant ce calcul. Ces modèles nécessitent un temps de calcul assez élevé. Ils ne sont donc pas adaptés pour les calculs en temps réel, ou pour un grand nombre de sources.

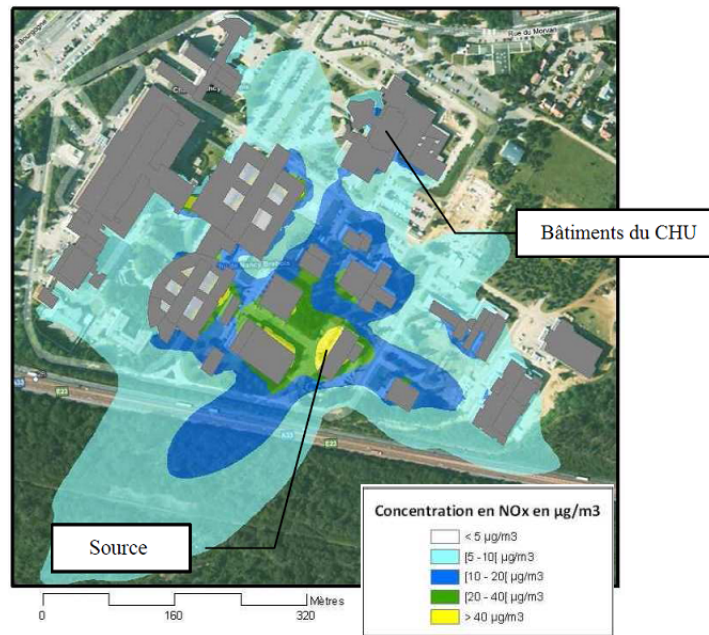


FIGURE 2.6 – Exemple d'utilisation du modèle lagrangien pour le calcul des émissions des unités d'un hôpital : Résultat obtenu avec le logiciel MSS (Aria Technologie) [40].

Nous rencontrons dans la littérature plusieurs modèles de dispersion atmosphérique avec une approche lagrangienne. Parmi ces modèles nous pouvons mentionner HYSPLIT model⁶ (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*), FLEXPART model⁷ (*FLEXible PARTicle dispersion model*), AUSTAL2000 [41], MSS (*Micro-Swift-Spray*) [40].

Ce dernier, développé par Aria Technologies, utilise une solution CFD (*Computational Fluid Dynamics*) simplifiée (Micro-SWIFT) pour modéliser les champs d'écoulement avec une résolution métrique, puis une approche lagrangienne (Micro-SPRAY) pour calculer la dispersion atmosphérique 3D des polluants.

Moussafir et al. [40] présente un exemple d'utilisation du code MSS pour modéliser les émissions de

6. HYSPLIT : http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php

7. FLEXPART : <http://flexpart.eu>

NO_x d'un complexe hospitalier (cf. figure 2.6). Sur cet exemple l'effet des bâtiments sur la dispersion des polluants est très bien illustré.

Les modèles eulériens tridimensionnels [37], [36] :

Ces modèles réalisent une résolution numérique de l'équation d'advection-diffusion sur un maillage de l'espace. Comme pour les modèles lagrangiens, ils sont couplés à un modèle eulérien pour le calcul du champ de vent (calcul effectué sur le même maillage). Ces modèles ne sont pas adaptés au calcul en temps réel, en raison de leur temps de calcul assez important.

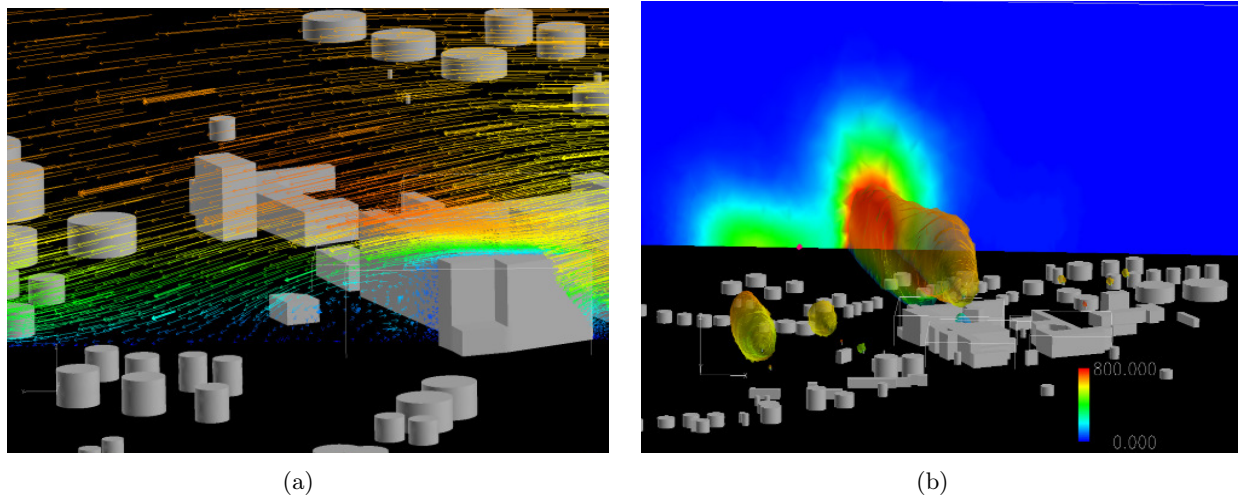


FIGURE 2.7 – Exemple d'utilisation du modèle eulérien tridimensionnel obtenu avec le logiciel FLUENT 6.3 sur la raffinerie de Donges : (a) Champ des vecteurs vitesse, (b) distribution de la concentration du panache [36].

Dans la littérature on trouve une multitude de codes de calcul de dispersion atmosphérique suivant une approche eulérienne, tels que : FLACS (*FLame ACceleration Simulator*) [42], STAR-CD [43], CFX [44] [41] et FLUENT [45]. Un exemple d'utilisation du code de calcul FLUENT est présenté dans le travail de Vendel [36]. Comme on peut le voir sur la figure 2.7, FLUENT 6.3 est utilisé pour déterminer le champ de vent autour de la raffinerie Total de Donges (cf. figure 2.7-(a)), puis la dispersion des émissions de cette usine est retrouvée (cf. figure 2.7-(b)).

Comparaison entre les différentes approches

Une étude comparative entre trois codes pour le calcul de la dispersion de gaz à grande échelle est présentée dans [41]. Les codes sélectionnés par *Habib et al.* lors de cette étude sont : VDI Guideline 3783 (approche gaussienne), AUSTAL2000 (approche langrangienne) et ANSYS CFX v14.0 (approche eulérienne). Ces comparaisons ont été réalisées sur deux scénarii pris de la série de tests connue sous le nom de « Prairie Grass » développée par Barad [46]. Il s'agit du scénario Nr. 10 correspondant à une atmosphère instable (classe B de Pasquill cf. le tableau 2.2) et du scénario Nr.

36 avec une atmosphère très stable (classe F de Pasquill cf. le tableau 2.2).

Cette étude montre que les codes AUSTAL2000 et CFX permettent d'obtenir des résultats acceptables avec des erreurs sur les concentrations inférieures à 50 % par rapport aux mesures. Avec les paramétrisations utilisées le code CFX est mieux adapté pour le calcul des scénarii avec une atmosphère stable.

Par ailleurs, le code gaussien VDI Guidline 3783 sous-évalue la concentration du gaz à 100 m de la source d'un facteur 10 pour le cas d'une atmosphère stable. Même dans le cas d'une atmosphère instable, la sous-estimation de la concentration reste importante (facteur 5).

Conclusion

À moins d'être bien paramétrés, les modèles gaussiens ne fournissent que des résultats grossiers de la dispersion des gaz. Ils sont difficilement utilisables pour des écoulements compliqués (relief, obstacles multiples,...) ou pour traiter des processus physico-chimiques complexes. Cependant, ils fournissent un résultat en peu de temps (quelques secondes) [36].

L'approche lagrangienne fournit des résultats performants et adaptés au champ proche des sources. Elle modélise assez bien la dispersion du panache, mais s'adapte assez difficilement à la description des processus physico-chimiques et utilise une description géométrique très simplifiée des bâtiments. Le temps de calcul des méthodes de cette famille est de l'ordre de la dizaine de minutes [36].

Enfin, l'approche eulérienne permet d'obtenir de très bons résultats, car elle modélise assez bien les processus physico-chimiques de la dispersion, ainsi que la géométrie 3D des bâtiments. Cependant, au voisinage des sources, les hypothèses effectuées conduisent à une surestimation de la diffusion. En revanche, le temps de calcul des méthodes eulériennes est de l'ordre de quelques heures [36].

Le besoin exprimé lors de notre travail en terme de modélisation de la dispersion des panaches, ne nécessite pas une grande précision sur la distribution des concentrations. Il n'est donc pas indispensable d'avoir une modélisation pointue des processus physico-chimiques de la dispersion. Par conséquent, notre choix s'est porté sur l'approche gaussienne, qui a l'avantage de fournir un résultat opérationnel en un temps raisonnable. Nous devons tout de même avoir à l'esprit que l'erreur introduite par une approche gaussienne peut atteindre, dans des cas peu favorables (faibles concentrations loin de la source pour des atmosphères stables), un facteur 10 sur la concentration des gaz du panache.

2.2.4 Outil pour l'introduction du panache de gaz

L'introduction des panaches dans nos images synthétiques commence par une spécification des données de l'émission et des conditions météorologiques (géométrie de la cheminée, type de gaz, débits, vitesse du vent, etc.). Ces informations sont alors utilisées pour obtenir un modèle de dispersion du panache selon une approche gaussienne. Dans un premier temps, nous avons eu recours au logiciel ADMS-Airport [38] afin de déterminer la distribution des différents gaz d'une scène donnée. Pour des raisons de simplicité et d'opérationnalité nous avons développé, dans un second temps, notre propre outil de génération de panache gaussien. Puis, nous avons intégré ce module de création de panache dans notre processus général de génération de scènes industrielles.

L'approche gaussienne (cf. [47]) que nous avons utilisé est basée sur la formule 2.1, qui décrit la distribution spatiale de la concentration d'un gaz g émis par une source ponctuelle sous les hypothèses suivantes :

- La météo de la scène est stationnaire, et l'écoulement est homogène (sol plat),
- Le polluant est de même densité que l'air : l'axe du panache est horizontal à partir d'une certaine distance de la source,
- La source ponctuelle d'émission est placée au point de coordonnées : $(x_s = 0, y_s = 0, z_s = h_0)$, le débit d'émission du gaz g (Q_g) est constant dans le temps,
- Le direction du vent est définie par : $(\vec{u} = u \cdot \vec{x})$,
- La diffusion dans la direction du transport \mathbf{x} est négligée.

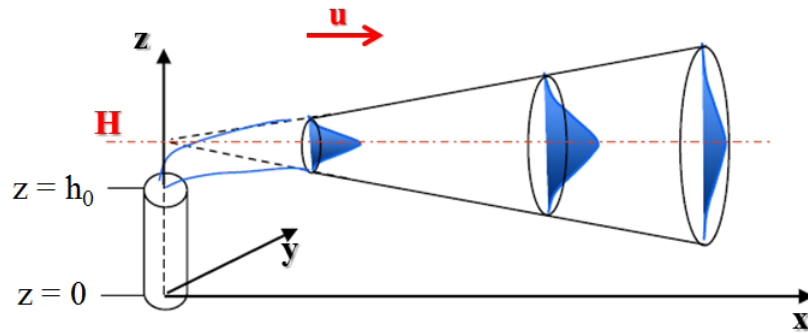


FIGURE 2.8 – Schéma illustrant la distribution gaussienne d'un panache de gaz (source : cours dispensé par Isabelle CALMET à l'école centrale de Nantes 2013/2014).

La distribution 3D de la concentration (C_g) du gaz g est donnée par la formule suivante :

$$C_g(x, y, z) = \frac{Q_g}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) \right] \quad (2.1)$$

Avec :

- Q_g : le débit d'émission du gaz g ,

- u : la vitesse du vent,
- σ_y : le coefficient de dispersion latérale,
- σ_z : le coefficient de dispersion verticale,
- H : la hauteur au-dessus du sol de l'axe du panache.

Détermination de la hauteur H [47] :

La hauteur moyenne du panache H (cf. figure 2.8) s'exprime en fonction de la hauteur de la cheminée h_0 , de son rayon r_0 , de la vitesse d'éjection m et de la position x :

$$H(x) = h_0 + 3 \left(\frac{r_0 \cdot m^2}{m + 3} \right)^{2/3} x^{1/3} \quad (2.2)$$

Calcul des coefficients de dispersion :

La concentration donnée par la formule 2.1 dépend fortement d'une bonne estimation des coefficients de dispersion σ_y et σ_z . Dans notre module de création de panache, nous avons eu recours aux relations empiriques de Pasquill et Grifford [48], qui permettent d'estimer σ_y et σ_z en fonction des classes de stabilité de Pasquill et de la distance à la source x grâce aux formules 2.3 et 2.4 :

$$\sigma_y(x) = \frac{k_1 \cdot x}{\left(1 + \frac{x}{k_2}\right)^{k_3}} \quad (2.3)$$

$$\sigma_z(x) = \frac{k_4 \cdot x}{\left(1 + \frac{x}{k_2}\right)^{k_5}} \quad (2.4)$$

Les constantes k_i sont déterminées empiriquement pour les différentes classes de Pasquill. Leurs valeurs sont présentées dans le tableau 2.3.

Les classes de Pasquill représentent une description discrète de l'état de l'atmosphère sur la base des données disponibles aux stations météo (vitesse du vent à 10 m (u_{10}) et nébulosité (N)) en différenciant le jour et la nuit. Le tableau 2.2 donne les classes de stabilité atmosphérique de Pasquill en fonction de la vitesse de vent à 10 m de hauteur et de la couverture nuageuse.

La figure 2.9 présente un exemple de panache généré grâce au processus que nous venons de décrire. Il s'agit d'un panache de SO_2 émis avec un débit de 100 g/s d'une cheminée d'une hauteur de 20 m et d'un rayon de 3 m avec une vitesse d'éjection de 2 m/s. La vitesse du vent est de 2 m/s et les conditions météorologiques nous placent dans la classe de stabilité « C ».

A la sortie du module de création de panache, nous disposons de la distribution géométrique 3D de la concentration d'un gaz du panache, que nous pouvons à présent intégrer dans l'image globale

Vitesse du vent à 10 m : u_{10} (m/s)	Couverture nuageuse (jour)			Couverture nuageuse (nuit)	
	Faible	Partielle	Totale	Faible	Forte
$u_{10} < 2$	A	A-B	B	E	F
$2 \leq u_{10} \leq 3$	A-B	B	C	E	F
$3 < u_{10} \leq 5$	B	B-C	C	D	E
$5 < u_{10} \leq 6$	C	C-D	D	D	D
$6 < u_{10}$	C	D	D	D	D

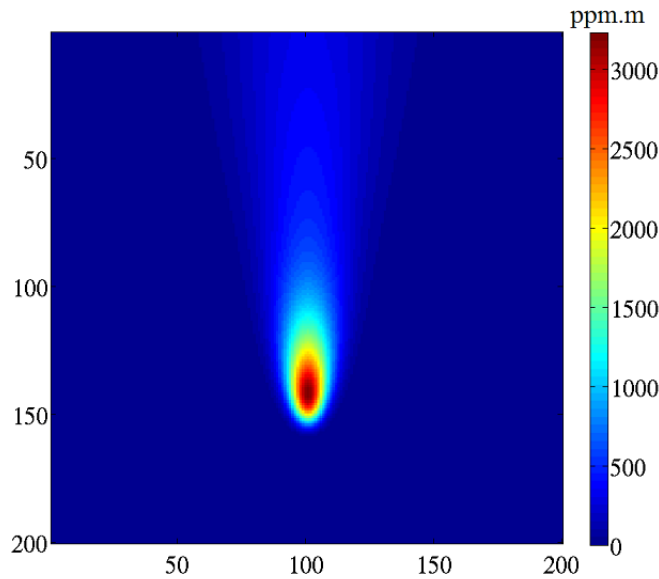
A : très instable
D : neutre

B : instable
E : stable

C : peu instable
F : très stable

TABLE 2.2: Classes de stabilité atmosphérique de Pasquill (source [48]).

Classes de stabilité	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
A	0.250	927	0.189	0.1020	-1.918
B	0.202	370	0.162	0.0962	-0.101
C	0.134	283	0.134	0.0722	0.102
D	0.0787	707	0.135	0.0465	0.465
E	0.0566	1070	0.137	0.0335	0.624
F	0.0370	1170	0.134	0.0220	0.700

TABLE 2.3: Valeurs des constantes k_i dans les équations 2.3 et 2.4 (source [48]).FIGURE 2.9 – Illustration d'un panache gaussien de SO_2 généré selon le modèle décrit ci-dessus : Distribution de la concentration intégrée du panache selon l'axe vertical.

de la scène. Pour ce faire, nous avons eu recours à la base de données du PNNL [49] (*Pacific Northwest National Laboratory*), qui regroupe les coefficients d'absorption de plus de 200 gaz d'intérêt. Cette base de données est issue de mesures réalisées par le PNNL à 3 températures différentes pour chaque gaz (5, 25 et 50 °C). Ces mesures ont été réalisées par l'instrument Bruker-66V FTIR, pour une bande spectrale allant de 1.538 μm à 16.667 μm , avec une résolution spectrale de 0.112 cm^{-1} . Dans nos travaux, nous avons utilisé systématiquement les valeurs des mesures pour une température de 25 °C. En négligeant l'impact de la température sur l'absorbance, l'erreur relative introduite sur l'absorbance est de l'ordre de 0.1 %/K.

A ce stade, la loi de Beer-Lambert (cf. la formule 1.4) permet d'exprimer la transmittance (τ_p) et l'émissivité ($\epsilon_p = 1 - \tau_p$) du panache de gaz en fonction des concentrations obtenues par le module de création de panache et les coefficients d'absorbance de la base PNNL. Ces deux grandeurs seront alors intégrées dans l'équation 1.9 du transfert radiatif.

2.2.5 Présentation des outils de transfert radiatif : performances et comparaison

Dans cette section nous allons présenter chacun des codes de modélisation du transfert radiatif, que nous avons rencontré lors de cette thèse (4A, MODTRAN et MATISSE). Ensuite, nous comparerons les performances des deux codes (4A et MODTRAN) que nous avons exploré plus en détail. Cette comparaison a été effectuée sur des cas typiques dans les bandes MWIR et LWIR, afin de choisir le code à utiliser pour la suite de la thèse.

4A

4A/OP⁸ (*Automatized Atmospheric Absorption Atlas*) est un code développé par NOVELTIS, conformément à l'accord signé entre le CNES, LMD/CNRS et NOVELTIS. L'objectif de ce code est de permettre la simulation rapide des transferts radiatifs, notamment dans le domaine de l'infrarouge [2 – 15 μm], soit avec une très haute résolution ($10^{-4} cm^{-1}$) soit avec la résolution spectrale des instruments simulés (5 – 20 cm^{-1}).

4A utilise un modèle de ligne de visée qui permet un calcul rapide du transfert radiatif, sans perte de précision grâce à la création préalable d'une base de données des épaisseurs optiques. Cette base de données nommée Atlas contient les épaisseurs optiques monochromes pour les différents constituants atmosphériques aux concentrations usuelles.

MODTRAN

MODTRAN⁹ (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*) est aussi un code de modélisation du transfert radiatif atmosphérique. Développé par Spectral Sciences Inc. et l'US Air

8. **4A/OP** : <http://4aop.noveltis.com/>

9. **MODTRAN** : <http://modtran5.com/>

Force Research Laboratory, MODTRAN est largement utilisé par la communauté de la télédétection. MODTRAN permet d'étudier toute la gamme spectrale allant de $0.2 \mu m$ jusqu'à $100 \mu m$ ($100 - 50000 \text{ cm}^{-1}$). Cependant, sa résolution spectrale est moins importante que celle que nous pouvons obtenir avec 4A. Avec la version MODTRAN5, on peut simuler des résolutions de l'ordre du dixième de cm^{-1} . Notre utilisation de MODTRAN est faite au travers du code COMANCHE (*C*ODE de *M*odélisation pour l'*A*Nalyse des *C*ibles *H*yperspectrales vues en *E*ntrée *i*nstrument) [50] développé par le DOTA.

MATISSE

Le code MATISSE¹⁰ (*Modélisation Avancée de la Terre pour l'Imagerie et la Simulation des Scènes et de leur Environnement*) a été développé par l'ONERA. Il permet de générer des images en luminance spectrale de fonds de scènes atmosphériques dans l'infrarouge à résolution spatiale kilométrique. Il couvre la saisie de scénarios de calcul à la fois en mode imagerie, et en mode ligne de visée. Ce deuxième mode correspond au calcul de la transmission et de la luminance totale le long d'un ou plusieurs trajet(s) optique(s). MATISSE propose deux fonctionnalités de calcul en ligne de visée : l'une à moyenne résolution spectrale (1 cm^{-1}), et l'autre à haute résolution spectrale (de 10^{-2} à 10^{-4} cm^{-1} selon les conditions thermodynamiques locales). Par ailleurs, MATISSE balaye un large domaine spectral allant de 700 à 25000 cm^{-1} .

Comparaison des performances de 4A et de MODTRAN

Lorsque cette étude a été réalisée, MATISSE n'était pas encore opérationnel pour la prise en compte de profils variables de gaz. Ce qui explique pourquoi seuls 4A et MODTRAN ont été considérés lors de cette étude comparative.

MODTRAN est le code de transfert radiatif le plus communément utilisé dans la littérature. Il a l'avantage de fournir des résultats de calcul plus rapidement que 4A. En effet, 4A effectue ses calculs à une très haute résolution spectrale, puis convolue les résultats obtenus pour arriver à la résolution demandée. A titre indicatif, pour un profil donné et pour une résolution de 1 cm^{-1} , MODTRAN fournit le résultat au bout de 2 ou 3 s, tandis que pour 4A une trentaine de secondes est nécessaire. Notre choix s'est donc porté sur ce code, car une résolution de 1 cm^{-1} est suffisante pour modéliser les images hyperspectrales des capteurs actuels. De plus, ce choix nous a permis de reprendre certains modules développés à l'ONERA en se basant sur MODTRAN (tel que COMANCHE).

Afin de pouvoir estimer le bruit de modèle dû au transfert radiatif dans notre outil de synthèse d'images hyperspectrales, nous avons réalisé une étude comparative des performances des codes 4A

10. **MATISSE** : <http://matisse.onera.fr/>

et MODTRAN pour la simulation des réponses spectrales des nuages de gaz.

Présentation des simulations

La comparaison des performances des deux codes nécessite l'utilisation du même type de profils atmosphériques en entrée pour les deux codes. Nous avons donc développé un outil qui permet de générer conjointement le même profil adapté à la fois pour 4A et MODTRAN. Nous avons aussi adapté le format de sortie des deux codes pour pouvoir les comparer.

Pour toutes les simulations réalisées lors de cette étude, le profil atmosphérique pris en considération est constitué de 20 couches comprises entre les altitudes suivantes : 0, 0.08, 0.1, 0.2, 0.22, 0.5, 1.5 , 2.5 , 3.5, 4.5, 7.5, 10.5, 13.5, 16.5, 19.5, 24.5, 29.5, 39.5, 49.5, 59.5 *km*. L'instrument de mesure est placé à une altitude de 3 *km*.

Nous nous sommes par ailleurs placés dans le cas d'une émissivité du sol qui vaut 0.98 (ce qui correspond au cas de la mer).

Nous avons pris au niveau du sol, une température égale à 295 *K* (21.85 °C), une pression égale à 1013.15 *mb* et une concentration en vapeur d'eau de 10000 *ppmv*. Les profils de température et de pression sont déduits d'un profil de référence en appliquant une interpolation aux altitudes des couches considérées. Ce profil de référence, représentatif des profils climatologiques de l'hémisphère nord, provient de mesures réalisées par l'instrument ACE-FTS [51] (*Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectromete*).

Pour la température, l'interpolation est linéaire (altitude inférieure à 10 *km*), quant à la pression l'interpolation est exponentielle (cf. Formule du nivellement barométrique [52]).

En ce qui concerne la vapeur d'eau, nous avons construit par interpolation un modèle de décroissance exponentielle en altitude qui se rapproche le plus du profil de référence. Ainsi, on a :

$$CC_{H_2O}(z) = CC_{H_2O}(z = 0) \cdot \exp(-0.588 \cdot z) \quad (2.5)$$

Avec $CC_{H_2O}(z)$ la concentration de la vapeur d'eau à une altitude z .

D'autre part, pour certaines simulations la prise en compte d'un profil d'ozone est nécessaire. Comme pour la vapeur d'eau, nous avons construit un modèle se rapprochant du profil standard :

$$\begin{cases} CC_{O_3}(z < 33 \text{ km}) = \max \left(8.15 \cdot \exp \left(-\frac{(z-33)^2}{2 \cdot 8.15^2} \right), 0.0063 \right) \\ CC_{O_3}(z \geq 33 \text{ km}) = 7.91 \cdot \exp \left(-\frac{(z-33)^2}{2 \cdot 10.05^2} \right) \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec $CC_{O_3}(z)$ la concentration de l'ozone à une altitude z .

La Figure 2.10 présente les profils atmosphériques de ces quatre grandeurs.

Une première série de simulations a été réalisée dans la bande MWIR ([3.2 – 5 μm]). Plusieurs profils avec et sans panache ont été générés, puis testés pour les deux codes. Les panaches en question,

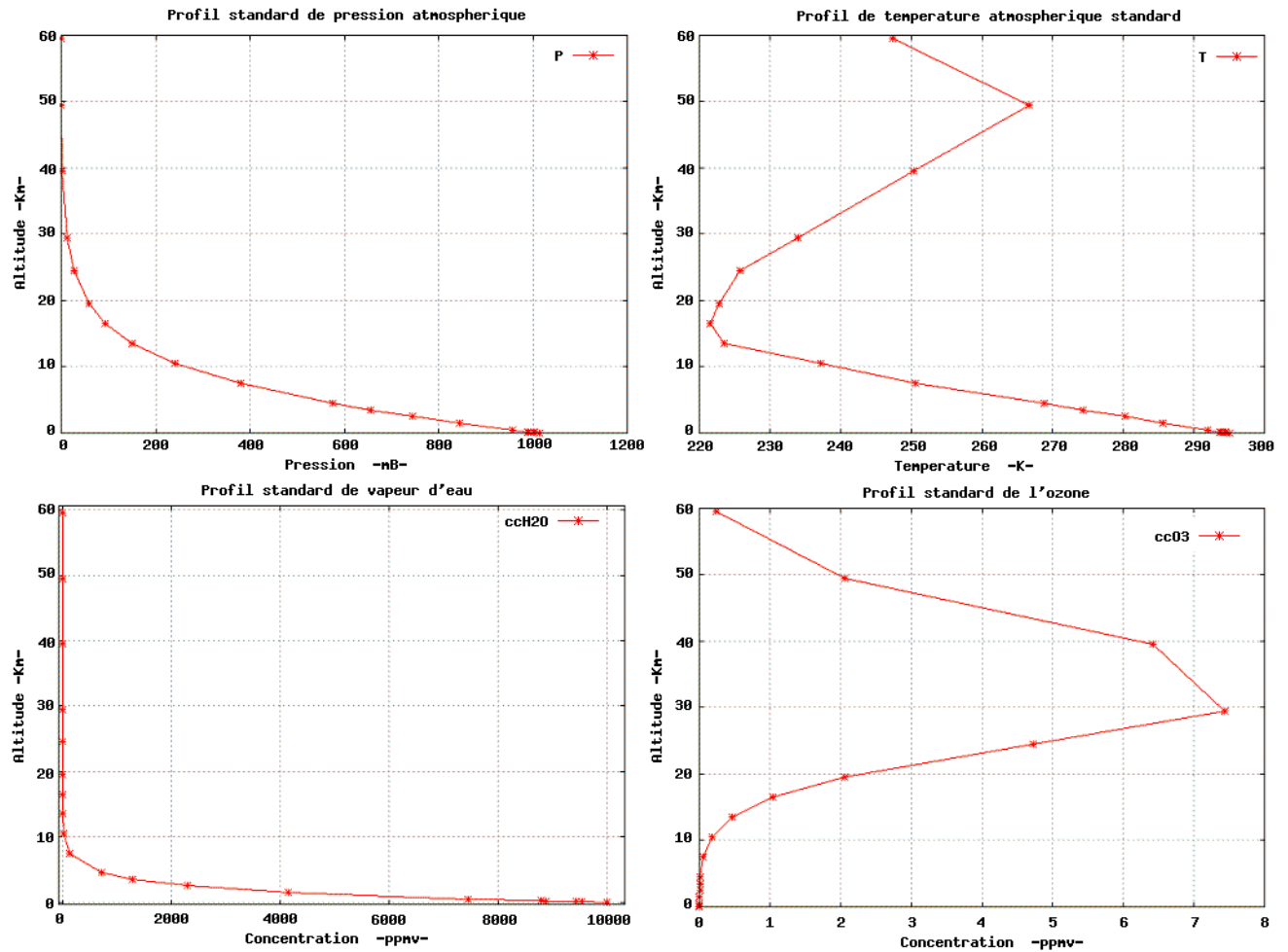


FIGURE 2.10 – Profils atmosphériques de la pression, de la température, et des concentrations de vapeur d'eau et d'ozone utilisés dans les simulations de comparaison 4A/MODTRAN

sont des nuages composés de méthane (CH_4) ou de dioxyde d'azote (NO_2) avec une concentration de 10 *ppmv* sur une épaisseur de 100 *m*. Pour les profils contenant un panache, nous avons augmenté la température aux altitudes du panache de 5 °C, par rapport aux températures des profils sans panache.

Dans cette bande spectrale, le soleil a un impact radiatif non négligeable. Par conséquent, chaque simulation a été réalisée à la fois à midi et à minuit. De plus, nous avons effectué un premier calcul, pour tous les profils, à une résolution spectrale de 1 cm^{-1} , et un autre à 10 cm^{-1} . Cette deuxième résolution correspond à ce que nous pouvons rencontrer pour certains instruments tels que Sieleters [53], Telops [54], AHS-160 [55], ...

Une autre série de simulation a été effectuée dans la bande spectrale LWIR ($[8 - 12.5 \mu\text{m}]$). Des panaches d'ammoniac (NH_3) et de dioxyde de soufre (SO_2) d'une épaisseur de 100 *m* et d'une concentration de 10 *ppmv* ont été testés et comparés à plusieurs profils de référence. L'augmentation de température au niveau du panache est là aussi égale à 5 °C.

Pour chaque profil, les calculs sont réalisés à deux résolutions spectrales : 1 cm^{-1} et 5 cm^{-1} (résolution spectrale de certains instruments existants).

Présentation des résultats dans la bande MWIR

Sans panache

Les trois graphes de la figure 2.11 présentent les résultats des simulations décrites précédemment pour le cas du profil de référence contenant uniquement les gaz atmosphériques usuels. Ces graphes présentent la température de brillance tracée en fonction du nombre d'ondes. On constate, une différence entre les deux codes au niveau de la bande d'absorbance du CO_2 entre 2200 – 2400 cm^{-1} . Ceci est dû au fait que les ailes des raies d'absorption du CO_2 sont très difficiles à modéliser dans cette partie du spectre (cf. [56]), MODTRAN et 4A utilisant des paramétrisations différentes.

On observe par ailleurs, qu'en dehors de cette zone les températures de brillance sont quasiment identiques durant la nuit et assez proches pendant la journée. Il y a en effet, un écart (*offset*) d'environ 0.3 *K* entre les deux courbes (cf. Zoom de la figure 2.11-(c)), dû à la modélisation du flux solaire à la résolution spectrale de 10 cm^{-1} . En imposant l'angle zénithal solaire égal à 20° pour 4A, nous constatons que les deux codes donnent des résultats plus concordants (cf. figure 2.12).

Avec panache

Pour comparer les résultats des deux codes de transfert radiatif pour les profils contenant un panache, nous avons privilégié de nous focaliser sur la comparaison des signatures des gaz NO_2 et CH_4 (cf. figure 2.13). Les signatures sont obtenues simplement en mesurant l'écart des réponses spectrales d'une atmosphère polluée (présence d'un panache) avec une atmosphère de référence en ciel clair (absence de panache).

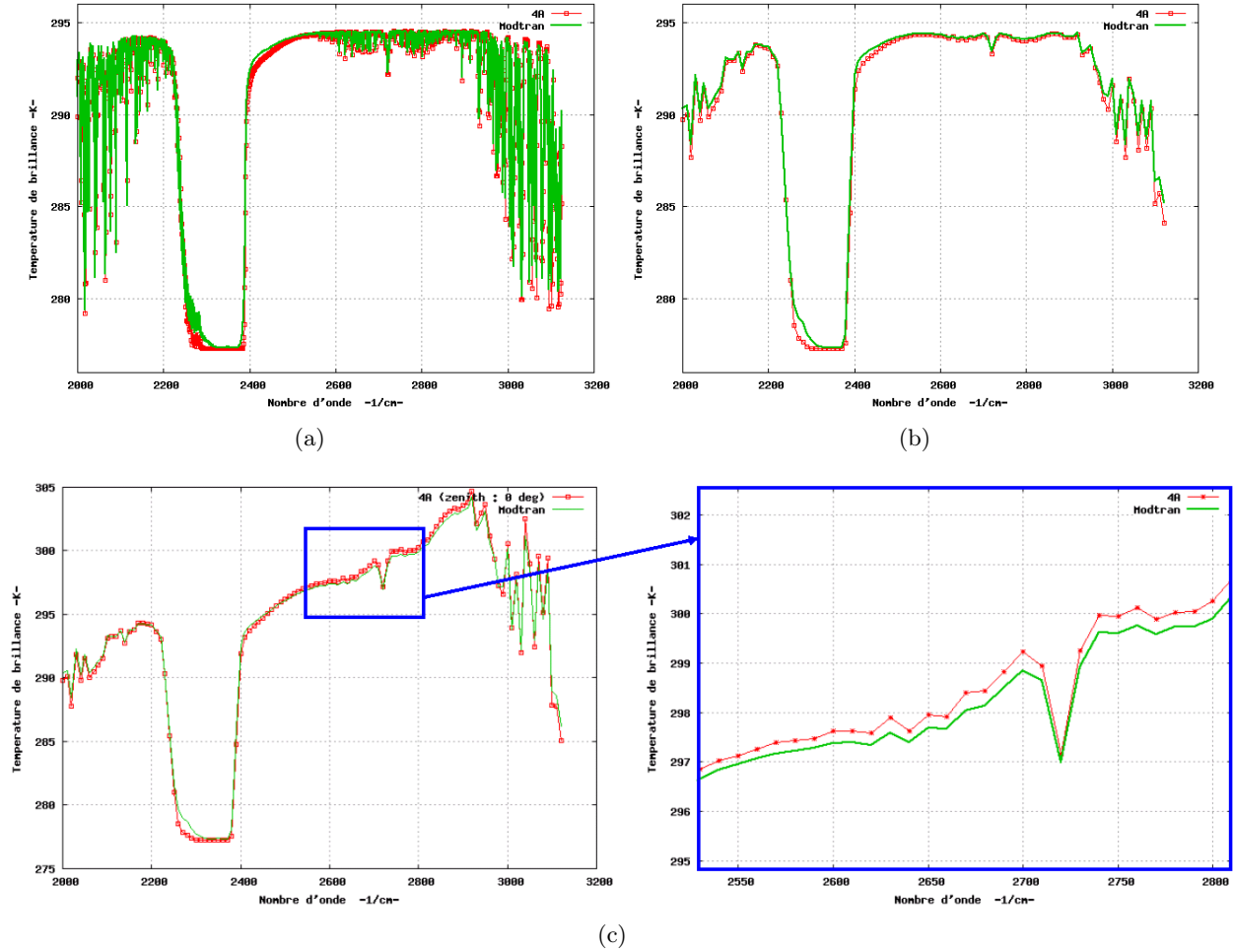


FIGURE 2.11 – Comparaison des réponses spectrales obtenues dans la bande MWIR par MODTRAN/4A pour une atmosphère de référence (sans panache) : (a) avec une résolution spectrale de 1 cm^{-1} (minuit), (b) avec une résolution spectrale de 10 cm^{-1} (minuit), (c) avec une résolution spectrale de 10 cm^{-1} (midi).

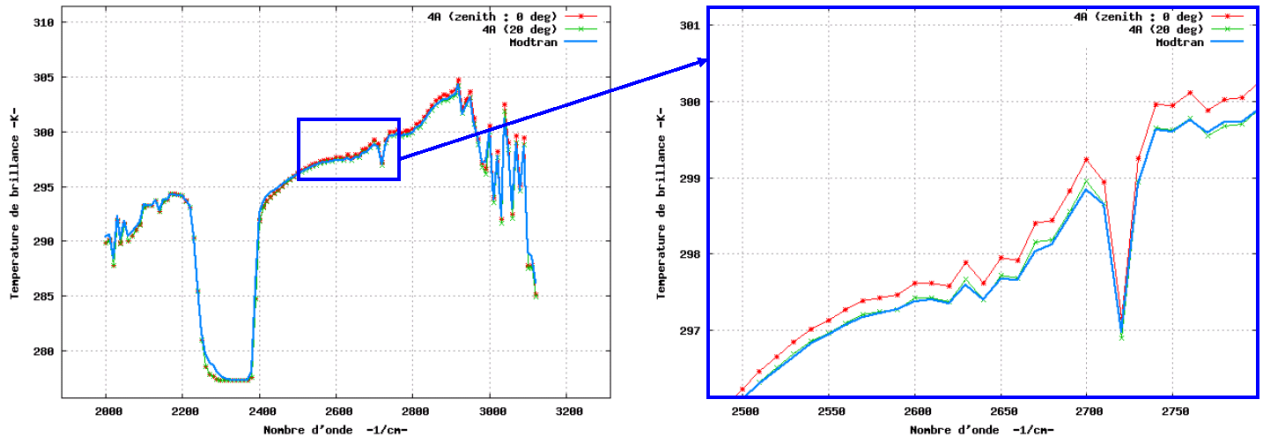


FIGURE 2.12 – Comparaison des réponses spectrales obtenues dans la bande MWIR par MODTRAN/4A, pour une atmosphère de référence (midi, 10 cm^{-1}) : impact de la modélisation du flux solaire

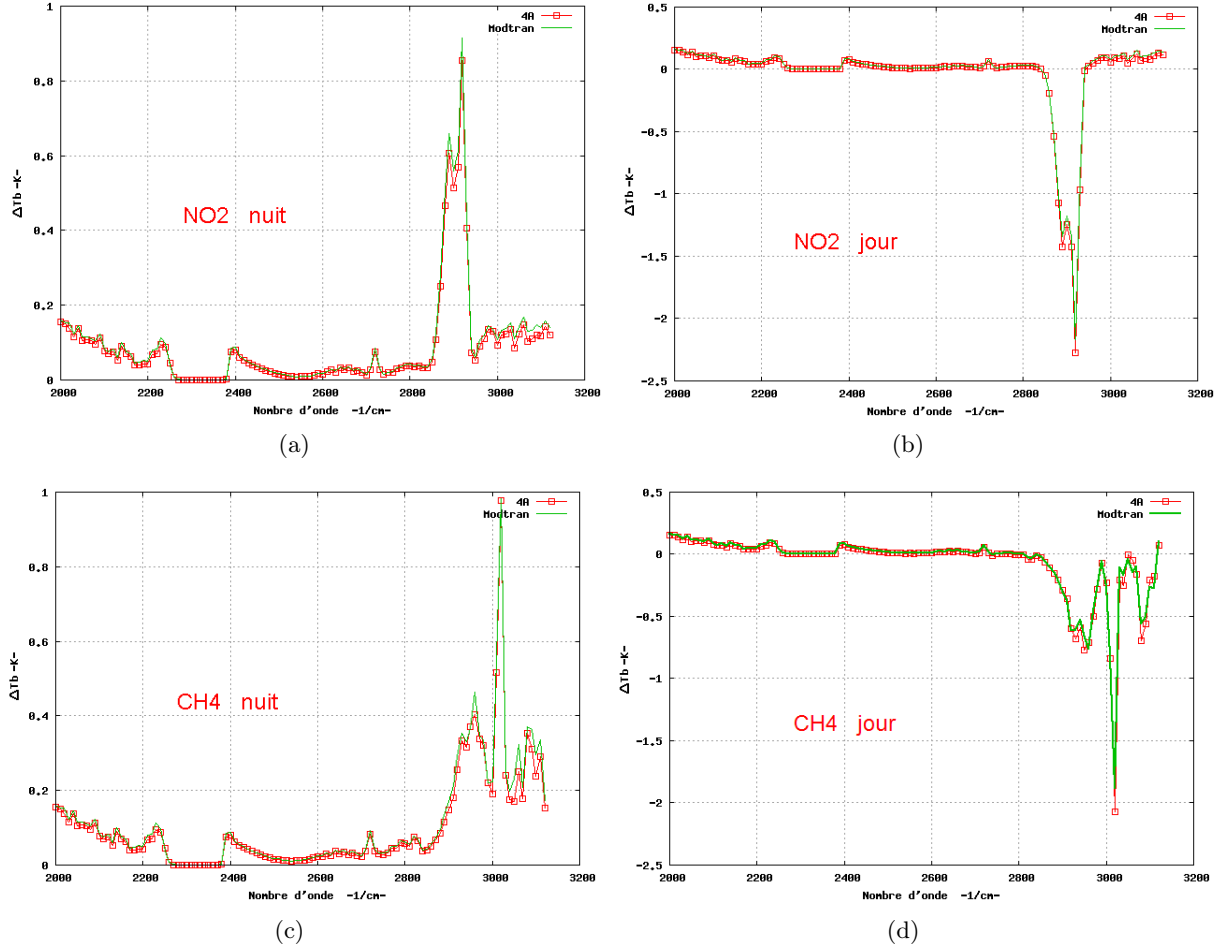


FIGURE 2.13 – Comparaison des signatures (en température de brillance) de panaches obtenues dans la bande MWIR par MODTRAN/4A pour une atmosphère de référence contenant un panache de : NO₂ ((a), (b)) ou de CH₄ ((c), (d)). Les calculs dans (a) et (c) ont été effectués à minuit, alors qu'ils sont réalisés pour (b) et (d) à midi.

Pour les deux gaz simulés dans la bande spectrale MWIR (NO_2 et CH_4), on observe qu'ils sont vus en émission durant la nuit 2.13-(a), (c) et en absorption durant la journée 2.13-(b), (d). Les signatures sont assez semblables pour 4A et MODTRAN : l'écart moyen entre les deux codes reste inférieur à 0.03 K pour les deux gaz aussi bien de jour que de nuit. Notons tout de même que pour certaines longueurs d'onde l'écart entre les deux signatures peut atteindre 7 % d'erreur relative.

Présentation des résultats dans la bande LWIR

Sans panache

Avec un profil atmosphérique contenant uniquement de la vapeur d'eau et du diazote (cf. Fig 2.14-(a)), on observe une légère différence ($\approx 0.1\text{ K}$) entre les résultats de 4A et MODTRAN. En effet, la température de brillance de 4A est inférieure en moyenne à celle de MODTRAN de 0.15 K , soit 0.05 % d'erreur relative. Cette différence s'explique par les interpolations qu'effectue chacun des deux codes pour modéliser les concentrations des différents gaz à travers chaque couche. 4A emploie une interpolation linéaire au milieu de chaque couche ; tandis que MODTRAN utilise une interpolation exponentielle pour estimer les différentes concentrations (cf. figure 2.15).

Avec le profil atmosphérique standard (cf. Fig 2.14-(b),(c)), on constate un biais similaire à celui que nous avons relevé pour le profil où il n'y a que de la vapeur d'eau et du diazote. Il y a par ailleurs, une différence plus importante ($\simeq 0.5\text{ K}$) entre les deux températures de brillance pour les longueurs d'onde $1000 - 1070\text{ cm}^{-1}$. C'est dans cette gamme que signe l'ozone, on en déduit que la différence est certainement due à l'estimation des concentrations d'ozone dans les différentes couches atmosphériques qui n'est pas calculée de la même manière dans les deux codes.

Il est envisageable de réduire l'impact de cette différence de modélisation en rajoutant des couches atmosphériques intermédiaires.

Avec panache

Lorsqu'on s'intéresse aux signatures du panache de l'ammoniac (cf. figure 2.16-(a)), on remarque que les deux codes de transfert radiatif retournent des résultats assez proches : différence inférieure à 0.1 K en température de brillance. La signature de MODTRAN reste légèrement au-dessus de celle de 4A pour les mêmes raisons d'interpolation que celles évoquées pour les deux profils précédents.

En revanche, pour le panache du dioxyde de soufre, on observe une grande différence entre les signatures du SO_2 données par 4A et MODTRAN au niveau des pics. L'écart relatif est de l'ordre de 8 %. En dehors de la zone de signature du SO_2 , les deux codes donnent des résultats similaires. L'écart entre les deux modèles que nous observons a deux origines distinctes : d'une part il y a la différence due aux interpolations différentes pour les deux codes. D'autre part, il y a une différence entre les deux codes au niveau de la modélisation des raies d'absorption et des seuils choisis pour

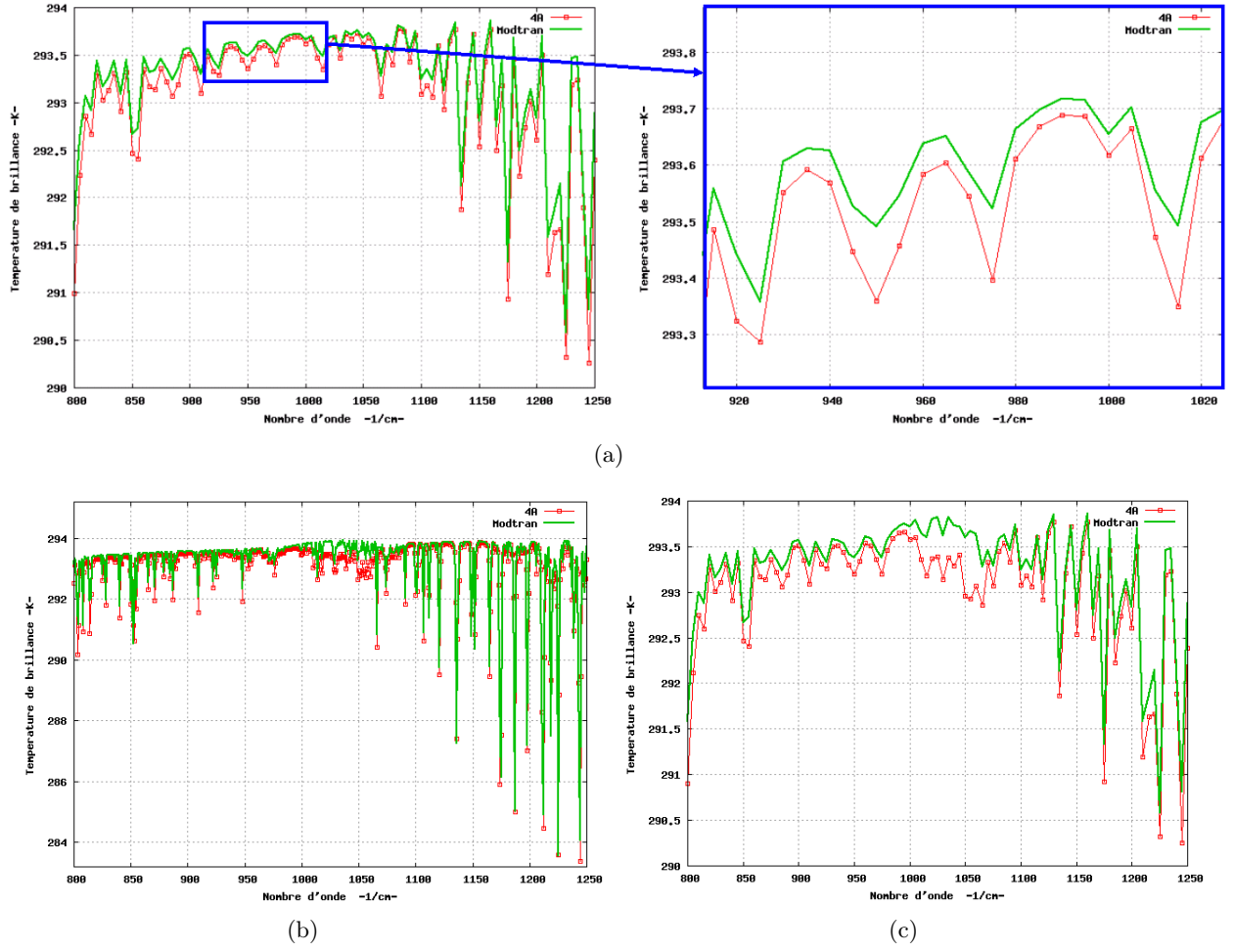


FIGURE 2.14 – Comparaison des réponses spectrales obtenues dans la bande LWIR par MODTRAN/4A : (a) pour une atmosphère ne contenant que du H_2O et du N_2 , en prenant une résolution spectrale de 5 cm^{-1} , (b) pour une atmosphère de référence avec une résolution spectrale de 1 cm^{-1} , (c) pour une atmosphère de référence avec une résolution spectrale de 5 cm^{-1} .

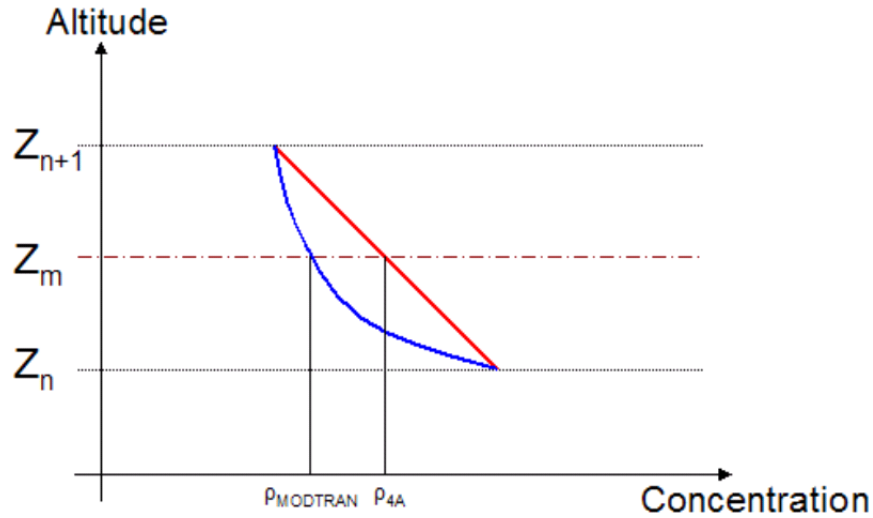


FIGURE 2.15 – Illustration de la différence de modélisation des concentrations entre MODTRAN et 4A.

effectuer les calculs du transfert radiatif pour chaque gaz (en particulier dans les atlas 4A).

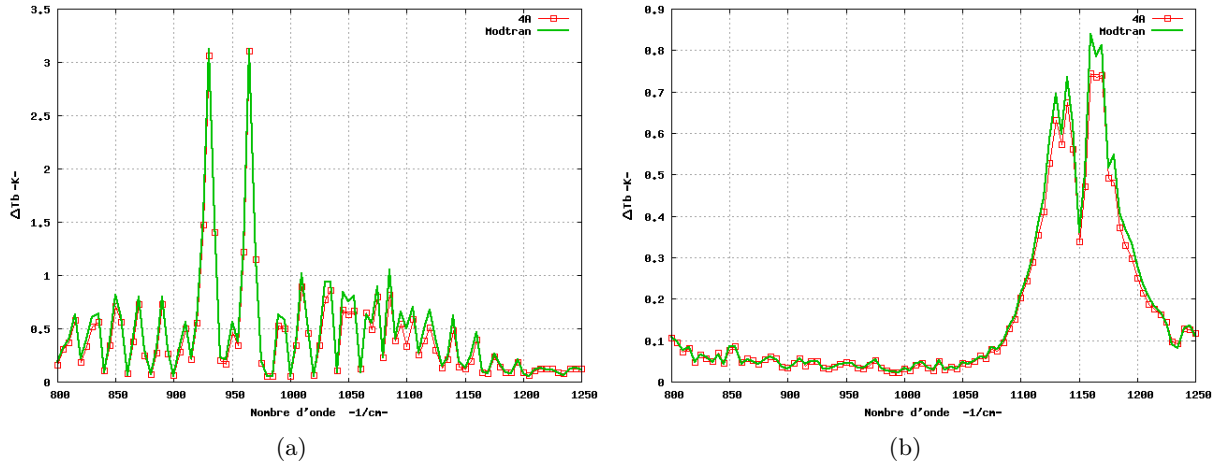


FIGURE 2.16 – Comparaison des signatures (en température de brillance) de panaches obtenues dans la bande MWIR par MODTRAN/4A pour une atmosphère de référence contenant un panache de : NH₃ (a) ou du SO₂ (b)

Le but de cette comparaison était de maîtriser l'erreur introduite par le code de transfert radiatif, que nous utiliserons pour la synthèse d'images hyperspectrales de scènes industrielles. Les résultats précédents montrent clairement qu'il y a de légers écarts entre les résultats de MODTRAN et de 4A, notamment au niveau des pics d'absorption/émission des gaz présents dans le profil. Cependant, ces différences restent assez faibles, d'autant plus lorsqu'on augmente le nombre de couches atmosphériques dans le profil. C'est pourquoi nous avons considéré que ces deux codes donnent des résultats similaires, avec un écart moyen inférieur à 0.1 K en température de brillance. Ce qui est acceptable au vue des performances des capteurs hyperspectraux.

Les résultats de cette étude comparative permettent de confirmer la pertinence de notre choix d'utiliser MODTRAN pour mettre en place notre outil de synthèse d'images hyperspectrales de scènes industrielles.

2.3 Description du simulateur d'images hyperspectrales de scènes industrielles

Après avoir détaillé les différents outils et bases de données utilisés dans notre modèle, nous allons à présent expliciter comment sont générées les images hyperspectrales des scènes industrielles. Nous commencerons par détailler la génération des pixels ne contenant pas de panache. Puis, nous expliquerons comment sont calculés les pixels avec panache.

Notons que pour cette section, seule la bande LWIR (7.5 – 12.5 μm) a été prise en considération. En effet, nous n'avons pas développé de modélisation simplifiée du signal reçu en entrée de capteur

dans la bande MWIR. Pour cette dernière les calculs seront effectués directement avec MODTRAN.

2.3.1 Prise en compte du fond de la scène

Le signal incident en entrée du capteur aéroporté s'exprime dans le cas d'une atmosphère sans panache, comme nous l'avons déjà vu (cf. équation 1.9) :

$$L_{\text{capteur}}(\lambda, T_{sfc}) = L_{\text{atm}}^{\epsilon}(\lambda) + (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot \frac{E_{sfc}^{\downarrow}}{\pi} \cdot \tau_{\text{atm}}(\lambda) + \epsilon_{sfc} \cdot B(\lambda, T_{sfc}) \cdot \tau_{\text{atm}}(\lambda)$$

Les termes $L_{\text{atm}}^{\epsilon}$, $\frac{E_{sfc}^{\downarrow}}{\pi}$ et τ_{atm} ne dépendent que du profil atmosphérique : ils ne sont pas sensibles aux variations de l'état du sol. D'autre part, le terme $B(\lambda, T_{sfc})$ est facilement calculé en connaissant la valeur de la température du sol. On en déduit que pour générer des pixels d'une image hyperspectrale représentant la même atmosphère sans panache (avec des variations de l'état du sol), il n'est pas nécessaire de refaire un calcul de transfert radiatif pour chacun des pixels. Il suffit en effet, de déterminer une fois pour toutes les termes $L_{\text{atm}}^{\epsilon}$, $\frac{E_{sfc}^{\downarrow}}{\pi}$ et τ_{atm} , puis d'utiliser l'équation 1.9 pour retrouver la luminance en entrée du capteur.

Détermination de la transmission atmosphérique (τ_{atm})

La transmission atmosphérique est calculée directement par MODTRAN, indépendamment des caractéristiques du sol considérées. Il suffit donc de réaliser un calcul MODTRAN avec le profil atmosphérique sélectionné pour l'image.

Détermination de la luminance montante émise par l'atmosphère ($L_{\text{atm}}^{\epsilon}$)

Cette luminance peut être vue comme la luminance en entrée du capteur, pour un sol à une température nulle (absence d'émission du sol) et avec une réflectivité nulle (absence du terme réfléchitif). On réalise donc une simulation avec MODTRAN en imposant la température et la réflectivité du sol à 0, on obtiendra alors la luminance montante émise par l'atmosphère.

Détermination de l'éclairement descendant au sol $\left(\frac{E_{sfc}^{\downarrow}}{\pi}\right)$

En prenant une température au sol égale à 0, on s'affranchit de la composante d'émission du sol. De plus, en considérant la réflectivité égale à 1, on peut écrire à partir de l'équation 1.9 :

$$\frac{E_{sfc}^{\downarrow}}{\pi} = \frac{L_{\text{capteur}}(\rho = 1, T_{sfc} = 0) - L_{\text{atm}}^{\epsilon}}{\tau_{\text{atm}}} \quad (2.7)$$

Ainsi pour obtenir l'éclairement descendant au sol, il suffit de réaliser une simulation avec MODTRAN, en prenant $\rho = 1$ et $T_{sfc} = 0$. Puis, utiliser l'équation 2.7 avec les valeurs obtenues précédemment pour $L_{\text{atm}}^{\epsilon}$ et τ_{atm} .

2.3.2 Intégration du panache

La présence d'un panache introduit plusieurs modifications dans l'équation de transfert radiatif. D'une part, avec une température différente de celle de l'atmosphère environnante le panache émet un rayonnement thermique. Ce rayonnement est dû à la fois aux gaz atmosphériques et à ceux du panache. L'épaisseur optique du panache modifie aussi le rayonnement émis ou réfléchi par le sol, de même que celui descendant vers le sol. Rappelons l'équation 1.9 du transfert radiatif en présence du panache :

$$\begin{aligned}
 L_{\text{capteur}}(\lambda, T_{\text{sfc}}, T_p) &= L_a^\uparrow(\lambda) \\
 &+ (1 - \epsilon_{\text{sfc}}(\lambda)) \cdot \frac{E_{\text{sfc}}^\downarrow}{\pi} \cdot \tau_p(\lambda) \tau_a(\lambda) \\
 &+ \epsilon_{\text{sfc}}(\lambda) \cdot B(\lambda, T_{\text{sfc}}) \cdot \tau_p(\lambda) \tau_a(\lambda) \\
 &+ \epsilon_p(\lambda) \cdot B(\lambda, T_p) \cdot \tau_a(\lambda)
 \end{aligned}$$

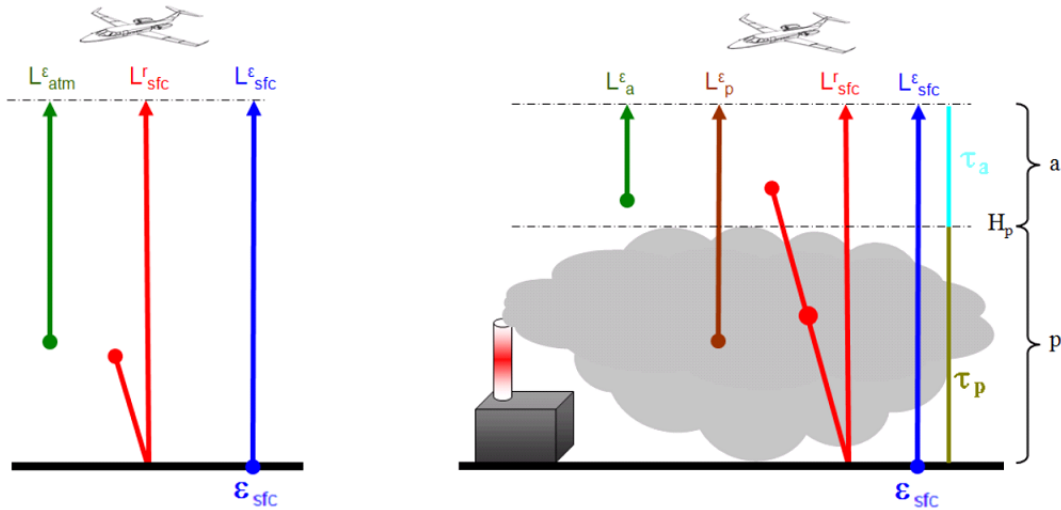


FIGURE 2.17 – Bilan radiatif dans le domaine thermique en absence et en présence d'un panache. (Rappel de la figure 1.5)

Dans cette équation les termes L_a^\uparrow et τ_a sont les seuls qui ne dépendent ni des données du panache ni de ceux du sol. Ils peuvent donc être calculés une seule fois pour toute l'image. Les autres termes seront calculés pour chacun des pixels comme nous allons le détailler ci-dessous, sans devoir passer par des simulations MODTRAN.

Détermination de la transmission de la couche « a » au-dessus du panache (τ_a)

La transmission de la couche (a) au-dessus du panache est obtenue par une simulation MODTRAN. Cette dernière est réalisée pour une couche comprise entre l'altitude du haut du panache (H_p) et celle du capteur aéroporté.

Détermination de la luminance montante émise par la couche a (L_a^\uparrow)

En considérant le profil atmosphérique sans panache, nous pouvons décomposer la luminance montante en deux termes : celle émise par la couche (a) que nous cherchons à déterminer, et celle de la couche du panache ($L_{p_atm}^\uparrow$). Cette deuxième composante n'est due qu'aux gaz atmosphériques présents dans la couche où sera introduit le panache.

On peut alors écrire :

$$L_{atm}^\epsilon = L_a^\uparrow + L_{p_atm}^\uparrow \cdot \tau_a \quad (2.8)$$

Nous avons expliqué dans la partie précédente comment déterminer le terme L_{atm}^ϵ . Le terme $L_{p_atm}^\uparrow$ est obtenu de la même façon, à la simple différence que la simulation MODTRAN est réalisée en plaçant le capteur aéroporté à l'altitude du haut du panache (H_p). Ce qui permet de retrouver $L_{p_atm}^\uparrow$. La luminance montante émise par la couche (a) est alors obtenue par la formule :

$$L_a^\uparrow = L_{atm}^\epsilon - L_{p_atm}^\uparrow \cdot \tau_a \quad (2.9)$$

Détermination de la transmission du panache (τ_p)

La transmission du panache est calculée pour chaque pixel à l'aide de la formule 1.4, à laquelle sont rajoutées les contributions des gaz atmosphériques présents dans la couche du panache. On a alors :

$$\tau_p = \tau_{p_atm} \cdot \exp\left(-\sum_i \kappa_i(\lambda) \cdot q_i\right) \quad (2.10)$$

Avec, κ_i le coefficient d'absorption du i^{me} élément du panache, et $q_i[ppmv \cdot m]$ la concentration du i^{me} composant du panache, intégrée sur la colonne du nuage.

La transmission due aux gaz atmosphériques (τ_{p_atm}) est une autre sortie de la même simulation MODTRAN permettant de retrouver $L_{p_atm}^\uparrow$. L'émissivité du panache est directement liée à sa transmission par la formule $\epsilon_p = 1 - \tau_p$.

Remarque :

Nous avons remarqué que lorsqu'on calcule la transmission totale entre le sol et le capteur, on ne retrouve pas le même résultat qu'en multipliant les transmissions de la couche du panache et celle de la couche (a) (cf. figure 2.18). Cette différence provient du fait que nous ne travaillons pas en monochromatique. L'intégration de la transmission totale sur une bande étroite de longueur d'onde n'est pas égale au produit des intégrations des deux transmissions τ_a et τ_p sur la même bande. Il faut donc introduire un coefficient correctif pour éliminer cet écart. Ce dernier est calculé une seule

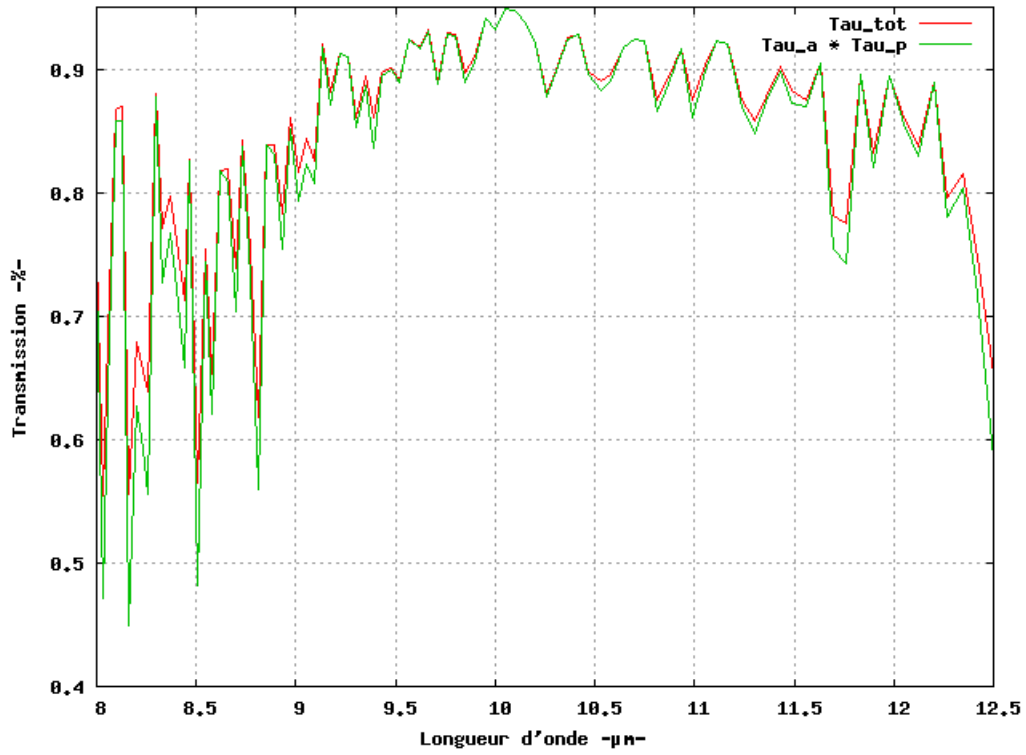


FIGURE 2.18 – Illustration de l'écart de transmission entre la transmission totale (τ_{tot}) et le produit des transmissions de la couche (a) (τ_a) et la couche du panache (τ_p), pour une atmosphère de référence (sans panache) ne contenant que les gaz atmosphériques.

fois pour toute l'image, en utilisant le profil atmosphérique ne contenant pas de panache.

$$\tau_{correc} = \frac{\tau_{tot}}{\tau_a \cdot \tau_p} \quad (2.11)$$

En introduisant le coefficient correctif dans l'équation 1.9, on obtient :

$$\begin{aligned} L_{capteur}(\lambda, T_{sfc}, T_p) &= L_a^\uparrow(\lambda) \\ &+ (1 - \epsilon_{sfc}(\lambda)) \cdot \frac{E_{sfc}^\downarrow}{\pi} \cdot \tau_p(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{correc}(\lambda) \\ &+ \epsilon_{sfc}(\lambda) \cdot B(\lambda, T_{sfc}) \cdot \tau_p(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{correc}(\lambda) \\ &+ \epsilon_p(\lambda) \cdot B(\lambda, T_p) \cdot \tau_a(\lambda) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Détermination de l'éclairement descendant au sol (E_{sfc}^\downarrow)

Pour calculer l'éclairement descendant au sol, il nous faut sommer toutes les luminances descendantes selon toutes les directions possibles (demi-sphère supérieure).

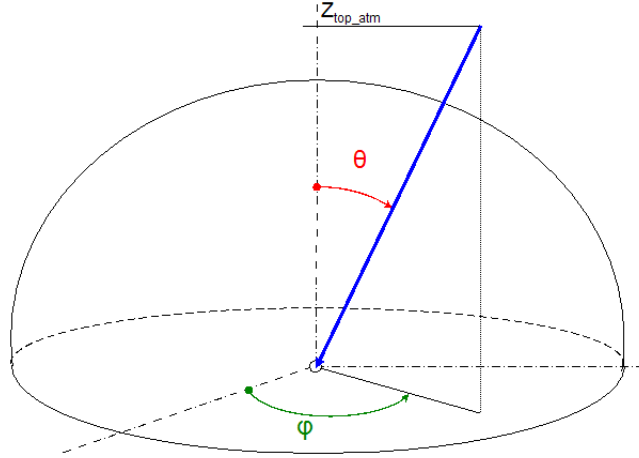


FIGURE 2.19 – Schéma illustrant la géométrie du calcul de l'éclairement arrivant au sol.

Ainsi, l'éclairement s'écrit comme étant l'intégrale de la luminance arrivant au sol sur la demi-sphère supérieure :

$$\begin{aligned} E_{sfc}^\downarrow(\lambda) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\theta) \cos(\theta) \overbrace{\sin(\theta) d\theta d\phi}^{d\Omega} \\ &= 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (2.13)$$

A ce stade, nous pouvons discrétiser la luminance observée selon une direction donnée. Le calcul de l'éclairement donne alors :

$$E_{sfc}^\downarrow(\lambda) = 2\pi \sum_{i=0}^{N-1} \int_{i\Delta\theta}^{(i+1)\Delta\theta} L(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (2.14)$$

Avec : $\Delta\theta = \frac{\pi}{2 \cdot N}$,

La luminance est alors considérée comme constante pour chaque intervalle $[i\Delta\theta, (i+1)\Delta\theta]$. On prendra la valeur moyenne : $L(\theta) = \frac{L(i\Delta\theta) + L((i+1)\Delta\theta)}{2}$.

L'expression de l'éclairement descendant au sol devient alors :

$$\begin{aligned} E_{sc}^\downarrow(\lambda) &= 2\pi \sum_{i=0}^{N-1} \frac{L(i\Delta\theta) + L((i+1)\Delta\theta)}{2} \underbrace{\int_{i\Delta\theta}^{(i+1)\Delta\theta} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta}_{-\frac{1}{2} \cdot \cos^2(\theta) \Big|_{i\Delta\theta}^{(i+1)\Delta\theta}} \\ &= \frac{\pi}{2} \sum_{i=0}^{N-1} [L(i\Delta\theta) + L((i+1)\Delta\theta)] \cdot [\cos^2(i\Delta\theta) - \cos^2((i+1)\Delta\theta)] \end{aligned} \quad (2.15)$$

Pour chaque angle θ , deux termes contribuent dans l'expression de la luminance descendante $L(\theta)$: le premier est la luminance descendante émise par une atmosphère sans panache ($L_{atm}^\downarrow(\theta)$), le deuxième est la luminance descendante émise par les gaz présents dans le panache ($L_p^\downarrow(\theta)$). On peut donc écrire la luminance descendante comme suit :

$$\begin{aligned} L(\theta) &= L_{atm}^\downarrow(\theta) \cdot \tau_p(\theta) + L_p^\downarrow(\theta) \\ &= L_{atm}^\downarrow(\theta) \cdot \tau_p(\theta) + (1 - \tau_p(\theta)) \cdot B(T_p) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Avec, $\tau_p(\theta)$ la transmission de la couche du panache dans la direction θ , que nous pouvons exprimer ainsi :

$$\tau_p(\theta) = \tau_{p_atm}(\theta) \cdot \exp \left(- \sum_i \kappa_i(\lambda) \cdot \frac{q_i}{\cos(\theta)} \right) \quad (2.17)$$

Où, $\tau_{p_atm}(\theta)$ est la transmission de la couche du panache dans la direction θ due uniquement aux gaz atmosphériques.

Par conséquent, pour obtenir l'éclairement descendant au sol pour un pixel donné, nous devons déterminer les termes L_{atm}^\downarrow et τ_{p_atm} pour les N directions introduites dans l'équation 2.15. MODTRAN nous permet de fixer la direction des calculs.

Pour chaque direction, on réalise deux simulations MODTRAN : la première est réalisée entre le haut de l'atmosphère et le sol, elle permet de retrouver L_{atm}^\downarrow . La deuxième est effectuée entre le haut du panache et le sol et nous donne τ_{p_atm} . Notons que pour ces deux cas le capteur est placé au niveau du sol.

L'avantage de cette modélisation de l'éclairement descendant est de pouvoir tenir compte de l'aspect fini du panache. En effet, les codes de transfert radiatif considèrent systématiquement les panaches comme des couches infinies.

Dans le cas d'un panache infini, une simplification des calculs est possible. Elle consiste à approcher la valeur de l'intégrale $\int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta$ par la valeur de la luminance pour un angle donné. En effet, plus l'angle θ augmente et plus la luminance descendante au sol augmente (cf. figure 2.20). D'où l'existence d'un angle compris entre 0° et 90° , pour lequel la valeur de la luminance descendante est égale à celle de l'intégrale des luminances descendantes. Comme on peut le déduire de la figure 2.20, l'angle recherché dépend de la longueur d'onde. Nous allons tout de même négliger cette dépendance.

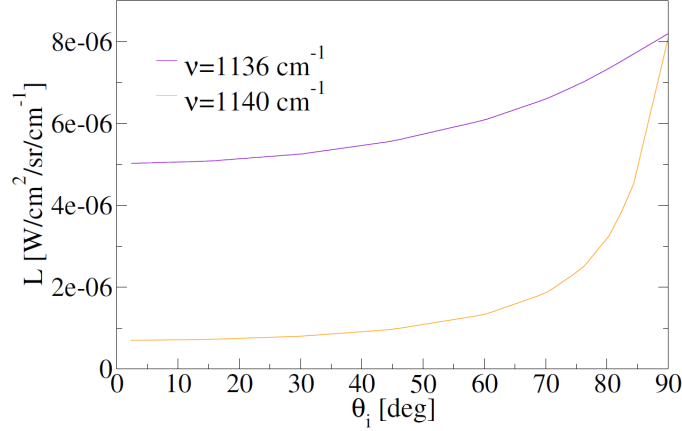


FIGURE 2.20 – Luminances directionnelles atmosphériques reçues par la surface visée en fonction de θ pour deux nombres d'onde. (cf. [57]).

Dans la littérature, cet angle est pris égal à 55° [58], pour une atmosphère standard mid-latitude en été. Nous avons tracé sur la figure 2.21, la luminance descendante au sol pour différents angles. Sur cette figure on voit bien que c'est pour l'angle 55° que la luminance descendante au sol ($L(55^\circ)$) coïncide au mieux avec la valeur de l'éclairement descendant au sol. Avec cette approximation, l'éclairement descendant au sol peut alors s'écrire :

$$E_{sf}^\downarrow(\lambda) = 2 \cdot \pi \cdot \left[L_{atm}^\downarrow(55^\circ) \cdot \tau_p(55^\circ) + (1 - \tau_p(55^\circ)) \cdot B(T_p) \right] \quad (2.18)$$

Nous avons estimé l'erreur moyenne commise en utilisant cette approche à 0.8 K en température de brillance équivalente à l'éclairement descendant au niveau du sol, ce qui correspond à une erreur relative de 0.4% . L'impact de cette erreur sera plus faible en entrée du capteur, car elle sera multipliée par la réflectance du sol, la transmission de l'atmosphère est divisée par le nombre π .

2.3.3 Prise en compte des bruits de mesure

Tout instrument hyperspectral comporte un bruit de mesure, comprenant un bruit lié à la chaîne d'acquisition (bruit instrumental) et des bruits environnementaux. Ce bruit de mesure est décrit par la NEDT (*Noise Equivalent to Differential Temperature*). Il s'agit de la différence de température qui produirait un signal égal au bruit de l'instrument sur un pixel. La NEDT représente donc ap-

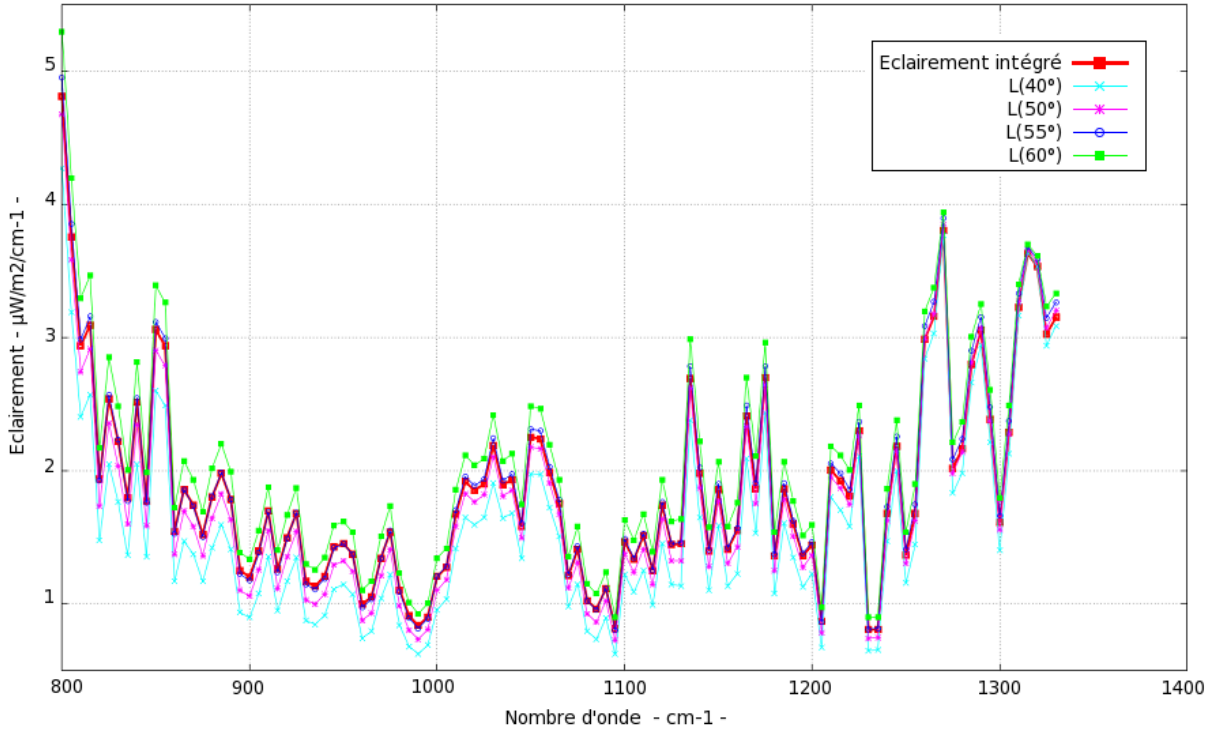


FIGURE 2.21 – Approximation de l'éclairement par la valeur de la luminance descendante pour différents angles.

proximativement la différence minimale de température que le senseur hyperspectral puisse résoudre.

Dans les tableaux 2.4 et 2.5, nous avons représenté les principales caractéristiques, en particulier la NEDT, de quelques instruments hyperspectraux dans le domaine de LWIR et MWIR.

Nom	Constructeur	Domaine spectral (μm)	Résolution spectrale (cm^{-1})	NEDT (mK)
TASI-600	ITRES	8 – 11.5	20	200
AHS-160	Caravan International	8 – 13		
Hypercam	TELOPS	8 – 11.5	5	200
AeroSPIM	ATE	7.8 – 11.7	15	300
Sieleters	ONERA	8 – 11.5	10	20
AisaOwl	Specim	7.5 – 12.5	10	100
SEBASS	Aerospace	7.5 – 13	5	50

TABLE 2.4: Principales caractéristiques d'instruments hyperspectraux LWIR.

Afin d'intégrer le bruit de mesure à notre simulateur de scènes hyperspectrales, nous l'avons modélisé par un bruit gaussien de moyenne nulle et de déviation standard égale à la NEDT choisie. Cette valeur a été prise égale à 50 mK pour les images dans la bande LWIR et 200 mK pour les images de la bande MWIR. Par ailleurs, nous avons admis que ce bruit est indépendant spectralement

Nom	Constructeur	Domaine spectral (μm)	Résolution spectrale (cm^{-1})	NEDT (mK)
MAISI-600	ITRES	3 – 5	20	> 200
AHS-160	Caravan International	3 – 5		
Hypercam	TELOPS	3 – 5		> 300
Sieleters	ONERA	3 – 5.5	16	55

TABLE 2.5: Principales caractéristiques d'instruments hyperspectraux MWIR.

et spatialement.

2.4 Description des scènes industrielles typiques

Dans cette partie nous présenterons tout d'abord les scénarios retenus pour être simulés et étudiés par la suite. Ensuite, nous montrerons les résultats obtenus pour des simulations utilisant le modèle gaussien.

2.4.1 Raffinerie Jean Gaulin au Québec

Étant donné que nous disposons d'acquisitions par l'instrument HyperCam-LW [54] de Telops de la raffinerie Jean Gaulin au Québec (figure 2.22), nous avons choisi ce site pour simuler les émissions d'une raffinerie.

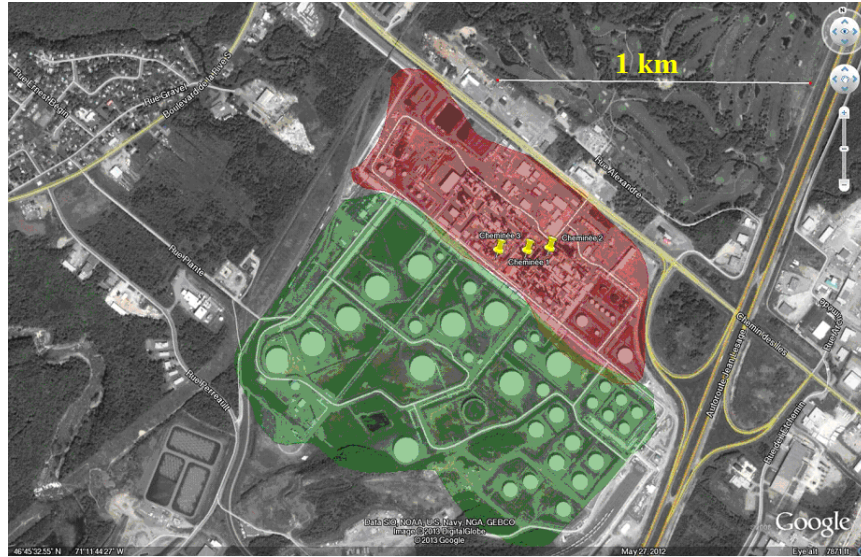


FIGURE 2.22 – Site de la raffinerie Jean Gaulin au Québec au sud du Québec. Trois cheminées sont localisées à l'intérieur de la zone d'émission (couleur rouge). La zone de stockage est colorée en vert.

Construction du sol

En nous inspirant de l'image de la raffinerie (figure 2.22) nous avons créé une scène synthétique contenant le même type de structures (cheminées, citernes de stockage, conduits métalliques, routes en asphalte,...). La figure 2.23 illustre la répartition spatiale des matériaux constituant le sol de la scène synthétique de la raffinerie.

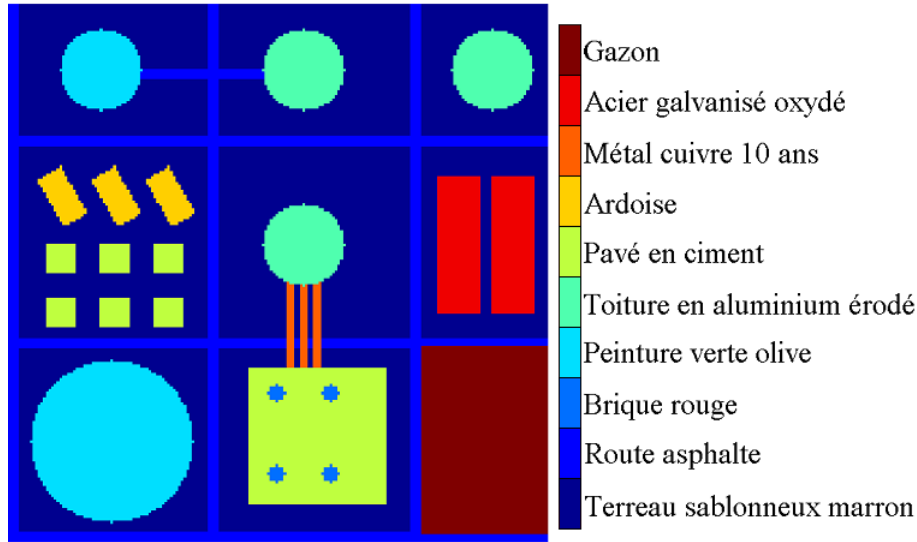


FIGURE 2.23 – Répartition spatiale des matériaux constituant le sol de la scène de la raffinerie.

Construction du panache

Pour simuler les émissions de la raffinerie nous avons choisi de définir deux scénarios de panache : le premier suppose que toutes les émissions du site proviennent de la même cheminée ; le deuxième prend en compte le fait que chaque unité de la raffinerie émet un panache à part. Dans ces deux cas, on considère un vent de 2 m/s . Les cheminées ont un diamètre de 3 m et une hauteur de 20 m et éjectent les gaz avec une vitesse de 2 m/s . Pour les deux scénarios, nous avons considéré que les conditions météorologiques indiquent une classe de stabilité « C ».

Scénario 1a (tab. 2.6)

Pour ce cas, on prendra en compte les débits ci-dessous (tab. 2.6) pour les gaz émis retenus. On considère une température en sortie de cheminée égale à 300°C .

Scénario 1b (tab.2.7 et tab.2.8)

Dans ce deuxième cas on sépare les émissions dues aux différentes unités de la raffinerie. Les émissions proviennent de deux cheminées éloignées d'une vingtaine de pixels l'une de l'autre (résolution métrique). La première cheminée permet de simuler l'unité de craquage catalytique de la raffinerie. La deuxième cheminée, quant à elle, regroupe les émissions de l'unité de production d'énergie et de

Gaz	Débit (en kg/h)	Concentration (en mg/m^3)
CO	28.5	250
SO ₂	800	7000
CH ₄	57	500
NO	110	1000
NO ₂	11	100
NH ₃	41	360

TABLE 2.6: Débits et concentrations en sortie de cheminée des gaz émis dans le scénario 1a (Raffinerie).

la zone de stockage. Les débits d'émissions des deux cheminées sont représentés respectivement dans les tableaux tab.2.7 et tab.2.8.

Cheminée 1 (unité de craquage catalytique) (tab. 2.7) : la température en sortie de cheminée est ici égale à 320°C.

Gaz	Débit (en kg/h)	Concentration (en mg/m^3)
CO	23	200
SO ₂	110	1000
NO	46	400
NH ₃	1.15	10

TABLE 2.7: Débits et concentrations en sortie de cheminée des gaz émis dans le scénario 1b (Cheminée 1 de la Raffinerie).

Cheminée 2 (unité de production d'énergie + unité de stockage) (tab. 2.8) : la température en sortie de cheminée est égale à 200°C.

Gaz	Débit (en kg/h)	Concentration (en mg/m^3)
CO	5.5	50
SO ₂	17	150
NH ₃	17	150

TABLE 2.8: Débits et concentrations en sortie de cheminée des gaz émis dans le scénario 1b (Cheminée 2 de la Raffinerie).

2.4.2 Cimentrie de Boussens : *Scénario 2a (tab. 2.9)*

Construction du sol

Comme pour la raffinerie, nous avons construit la scène synthétique de la cimenterie en nous basant sur l'image de la cimenterie de Boussens (figure 2.24). La distribution des matériaux constituant le sol de la scène est donnée dans la figure 2.25.



FIGURE 2.24 – Cimenterie de Boussens, avec les deux cheminées identifiées.

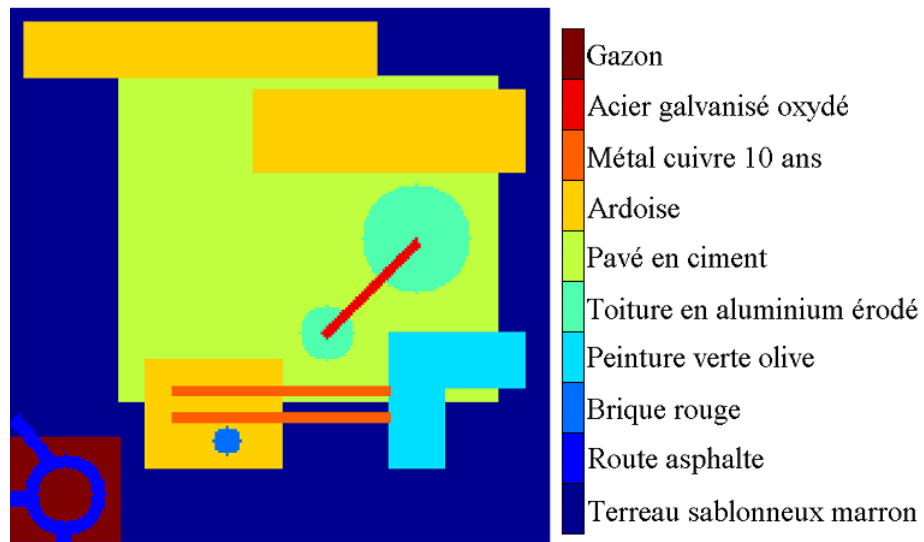


FIGURE 2.25 – Répartition spatiale des matériaux constituant le sol de la scène de la cimenterie.

Construction du panache

Dans notre modélisation de la cimenterie nous avons opté pour un unique scénario, où une seule cheminée émet tous les gaz polluants. On prendra pour cette simulation un vent de 2 m/s , et une température d'émission de 500°C . Les gaz sont éjectés avec une vitesse de 2 m/s , dans une atmosphère peu instable (classe « C » de Pasquill). Les débits d'émission des gaz sont représentés pour ce scénario dans le tableau tab.2.9.

Gaz	Débit (en kg/h)	Concentration (en mg/m^3)
SO ₂	114	1000
CO	57	500
NO	46	400
NO ₂	11.4	100

TABLE 2.9: Débits et concentrations en sortie de cheminée des gaz émis dans le scénario 2a (Cimenterie).

2.4.3 Incinérateur municipal de Toulouse : *Scénario 3 (tab. 2.10)*

Construction du sol

L'incinérateur de Toulouse (figure 2.26) nous a servi de modèle pour construire la scène synthétique d'une déchetterie. La figure 2.27 donne la répartition retenue pour les matériaux composants la scène synthétique de la déchetterie.

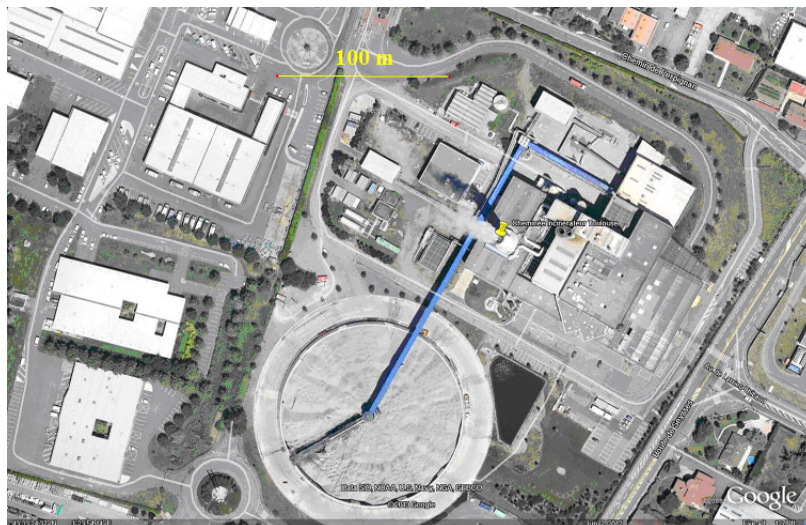


FIGURE 2.26 – Incinérateur de Toulouse, avec une cheminée identifiée

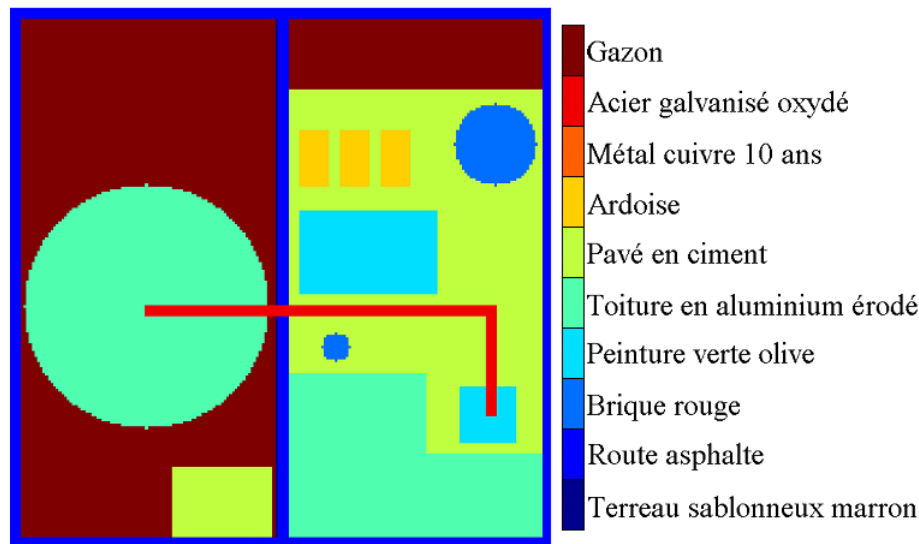


FIGURE 2.27 – Répartition spatiale des matériaux constituant le sol de la scène de l'incinérateur.

Construction du panache

Pour modéliser les émissions de l'incinérateur municipal de Toulouse (figure 2.26), nous nous baserons sur le scénario suivant :

Gaz	Débit (en kg/h)	Concentration (en mg/m^3)
SO ₂	2.3	20
CO	5.7	50
NO	3.4	30
NO ₂	2.3	20
N ₂ O	0.228	2
NH ₃	0.115	1
CH ₄	0.115	1

TABLE 2.10: Débits et concentrations en sortie de cheminée des gaz émis dans le scénario 3 (Incinérateur municipal).

La vitesse du vent pour ce scénario est égale à 3 m/s . La température en sortie de cheminée sera prise égale à 200°C , et la vitesse d'éjection des polluants est de 2 m/s . Ce scénario a été simulé pour une classe de stabilité atmosphérique « C ».

2.4.4 Cas d'un accident : incendie d'une cimenterie : *Scénario 2b (tab. 2.11)*

Pour définir le scénario d'un accident dans une cimenterie, nous allons nous baser sur le scénario 2a (cimenterie de Boussens). Nous supposons que les émissions lors de cet incident sont 100 fois plus importantes que les émissions nominales de la cimenterie. Comme il s'agit d'un incendie la température d'émission des polluants atteint des valeurs importantes : on la prendra égale à 1000°C .

Les conditions météorologiques de ce scénario impliquent une atmosphère peu instable (classe de stabilité « C »).

Le tableau tab.2.11 présente les débits et les concentrations des gaz émis lors de ce scénario.

Gaz	Débit (en kg/h)	Concentration (en mg/m^3)
SO ₂	11400	100
CO	5700	50
NO	4600	40
NO ₂	1140	10

TABLE 2.11: Débits et concentrations en sortie de cheminée des gaz émis dans le scénario 2b (Cimenterie).

2.5 Résultats et discussions

Dans cette section nous allons valider les résultats de notre modèle, en les comparant à ceux des simulations MODTRAN : d’abord, pour une atmosphère sans panache, puis avec une atmosphère contenant un panache.

2.5.1 Atmosphère sans panache

Pour valider notre modèle dans ce cas, nous avons comparé la luminance obtenue par une simulation directe MODTRAN et celle obtenue en sommant les trois termes radiatifs de l’équation 1.9. Le profil atmosphérique, sur lequel nous avons basé nos calculs, est le même que celui présenté dans la partie 2.2.5. La seule donnée à avoir été modifiée est la température du sol, elle a été prise égale à 285 K (11.85°C).

Comme nous l’avons expliqué dans la section précédente, deux calculs de luminance sont nécessaires afin de déterminer la totalité des termes du transfert radiatif. La première simulation est réalisée pour une température au sol de 1 K (au lieu de 0 K , pour éviter d’éventuels problèmes liés à MODTRAN) et une réflectivité de 0. Cette simulation permet de retrouver L_{atm}^ϵ et τ_{atm} . Un deuxième calcul visant à obtenir $\frac{E_{sfc}^\downarrow}{\pi}$, est effectué pour une température de 1 K et une réflectivité de 1. On obtient les résultats illustrés dans les figures 2.28 et 2.29 :

Après avoir calculé chacun des trois termes de l’équation 1.9, nous avons réalisé une simulation MODTRAN avec les mêmes entrées, afin de comparer les deux résultats. Les figures 2.30 et 2.31 montrent un très bon accord entre les luminances et les températures de brillance correspondantes obtenues par les deux méthodes.

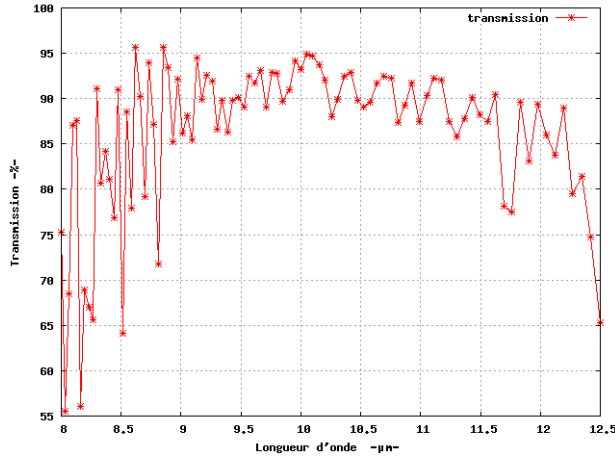


FIGURE 2.28 – Transmission du profil sans panache entre le sol et le capteur (3 km d'altitude)

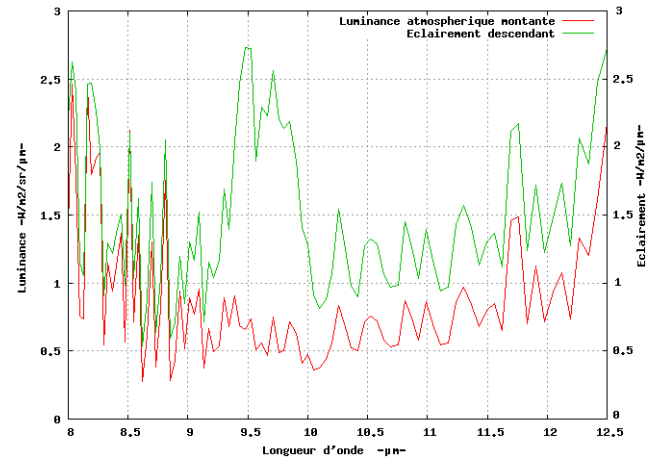
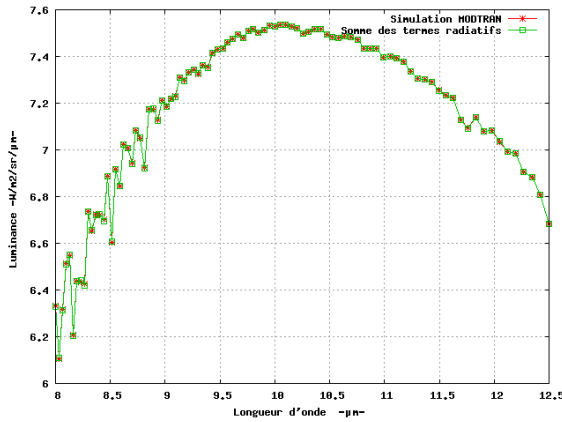
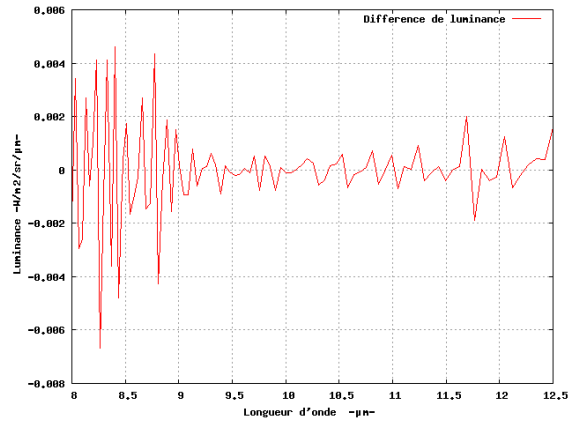


FIGURE 2.29 – Luminance atmosphérique montante et éclairement descendant au sol.



(a)



(b)

FIGURE 2.30 – (a) Comparaison des luminances obtenues par sommation des termes du transfert radiatif et par simulation MODTRAN. (b) Différence des luminances obtenues par sommation des termes du transfert radiatif et par simulation MODTRAN.

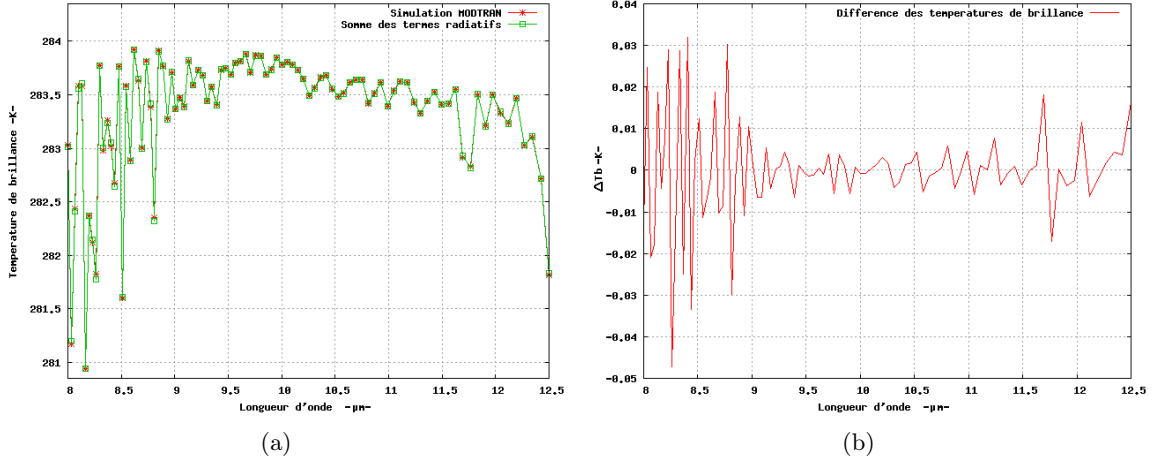


FIGURE 2.31 – (a) Comparaison des températures de brillance obtenues par sommation des termes du transfert radiatif et par simulation MODTRAN. (b) Différence des températures de brillance obtenues par sommation des termes du transfert radiatif et par simulation MODTRAN.

Les différences que nous observons sur les courbes précédentes sont très faibles : inférieures à 0.05 K en température de brillance. Elles sont donc négligeables puisqu'elles sont plus petites que le bruit de mesure des capteurs hyperspectraux. Elles sont de l'ordre de grandeur du bruit de modélisation (différence entre 4A/MODTRAN cf. § 2.2.5).

2.5.2 Atmosphère en présence de panache

Pour comparer les résultats de notre outil à ceux de MODTRAN, nous avons repris le même profil sans panache que celui de la section précédente ; puis nous avons introduit un panache de SO_2 entre les altitudes 0 et 100 m avec une concentration de 10 ppmv . Nous avons aussi augmenté la température du profil de 5 K pour les couches contenant du gaz.

Le calcul des différents termes radiatifs est réalisé comme nous l'avons expliqué précédemment. Les figures 2.32 et 2.33 illustrent les résultats obtenus pour les différentes composantes du signal.

La luminance totale obtenue par sommation des différents termes de l'équation 2.8 a été comparée à celle obtenue par une simulation MODTRAN. Les deux figures 2.34 et 2.35 présentent la comparaison entre les deux méthodes en termes de luminance et de température de brillance.

Ces figures montrent que nous avons de légers écarts entre les deux calculs ($0.06\text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$ en luminance et 0.4 K en température de brillance au maximum) ; localisés au niveau des pics d'absorption de la vapeur d'eau. En relatif, ces erreurs ne dépassent pas les 1 %, on peut donc les négliger. Rappelons que la comparaison entre 4A et MODTRAN donnait aussi des écarts au niveau des pics d'absorption des gaz présents d'environ 8 % en erreur relative.

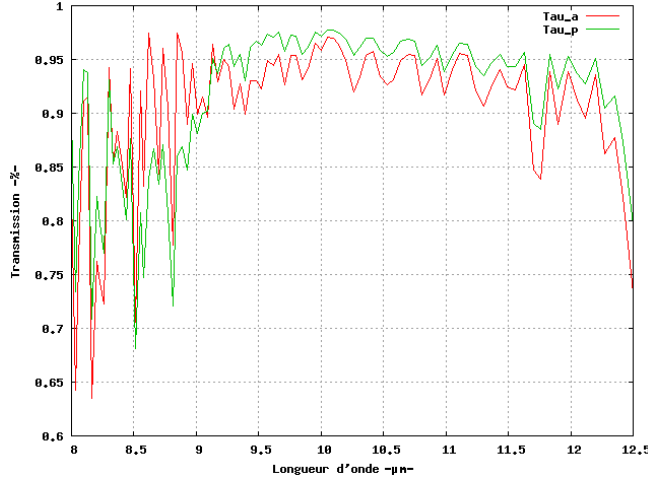


FIGURE 2.32 – Transmissions du profil avec un panache de SO_2 : Transmission de la couche atmosphérique au-dessus du panache (τ_a), transmission du panache (τ_p).

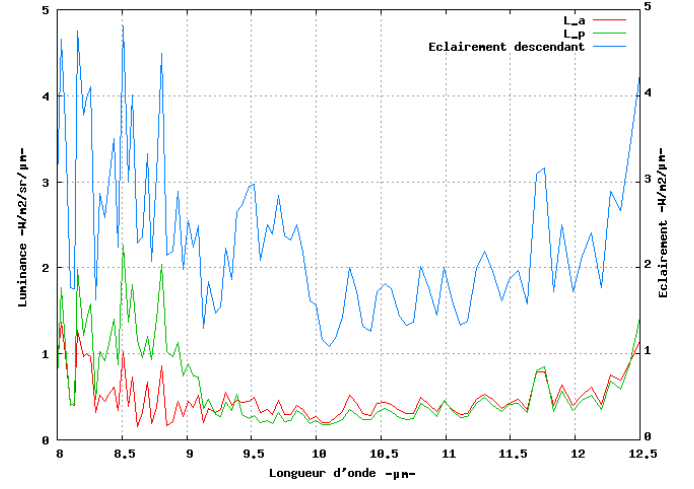
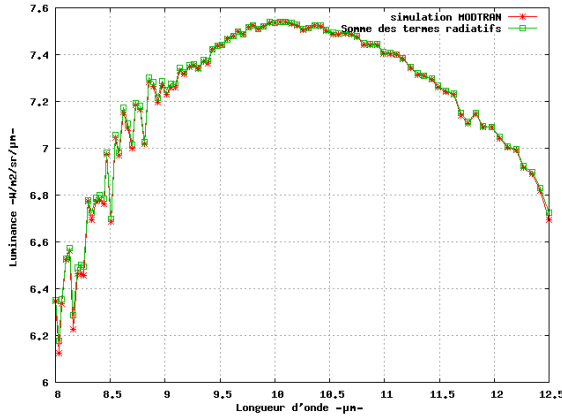
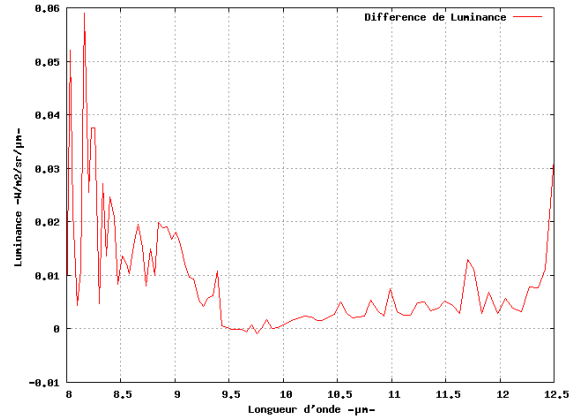


FIGURE 2.33 – Luminance atmosphérique montante (L_a), luminance émise par la couche du panache (L_p) et éclairage descendant au sol.



(a)



(b)

FIGURE 2.34 – (a) Comparaison des luminances obtenues par sommation des termes du transfert radiatif et par simulation MODTRAN. (b) Différence des luminances obtenues par sommation des termes du transfert radiatif et par simulation MODTRAN.

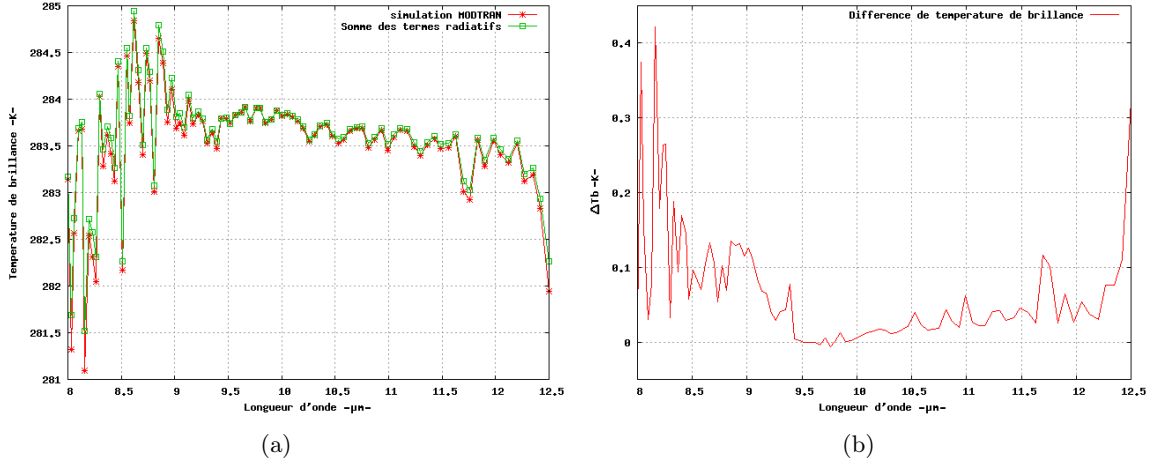


FIGURE 2.35 – (a) Comparaison des températures de brillance obtenues par sommation des termes du transfert radiatif et par simulation MODTRAN. (b) Différence des températures de brillance obtenues par sommation des termes du transfert radiatif et par simulation MODTRAN.

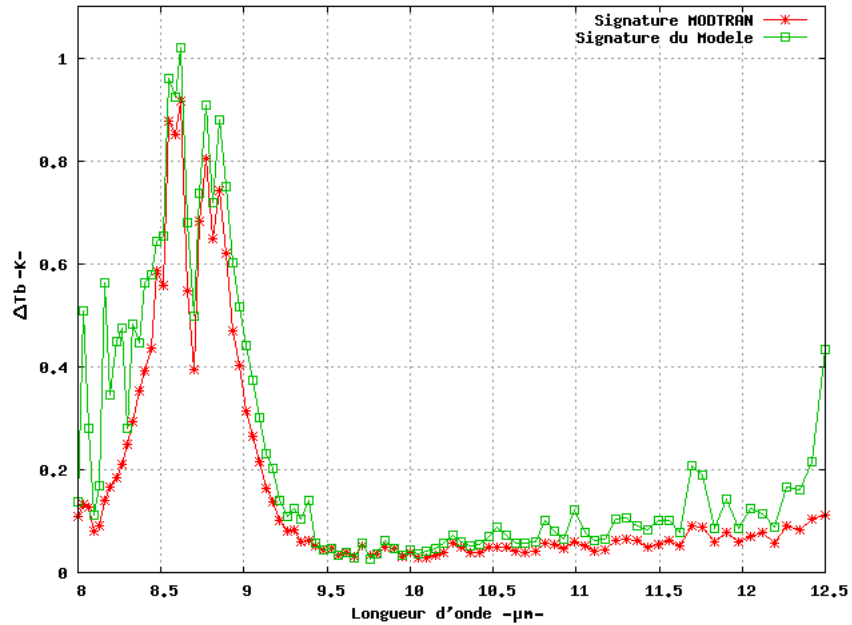


FIGURE 2.36 – Comparaison des signatures de gaz (SO_2) obtenues par sommation des termes du transfert radiatif (courbe verte) et par une simulation MODTRAN (courbe rouge).

La figure 2.36 présente la comparaison des deux méthodes en termes de signature du SO_2 présent dans le panache. La signature est obtenue simplement en calculant la différence entre le profil avec panache et celui sans panache.

Cette figure montre que notre modèle modélise relativement bien la signature du gaz. Les écarts observés de l'ordre de 0.4 K au maximum, sont dus essentiellement aux émissions de la vapeur d'eau. La raison qui explique cette différence est une mauvaise modélisation de la température dans notre modèle au niveau du panache. En effet, nous avons considéré que la température est homogène à l'intérieur de la couche du panache. Ce qui n'est pas le cas pour un panache étendu verticalement (100 m pour notre exemple).

2.5.3 Génération des scènes synthétiques

Dans cette partie nous allons présenter quelques résultats de génération complète d'images synthétiques. Nous détaillerons d'abord nos résultats dans la bande MWIR ($3 - 5\text{ }\mu\text{m}$), puis nous illustrerons les scènes générées dans la bande LWIR ($7.5 - 12.5\text{ }\mu\text{m}$).

Résultats de la bande MWIR

Parmi les gaz présents dans nos scénarii, CO , CH_4 , NO_2 , SO_2 et N_2O présentent une signature dans le domaine spectral ($3 - 5\text{ }\mu\text{m}$). Les quatre premiers gaz ci-dessus sont présents dans les panaches des deux scénarii modélisant la raffinerie (1a et 1b). Nous avons donc sélectionné ces deux scénarii pour illustrer nos résultats.

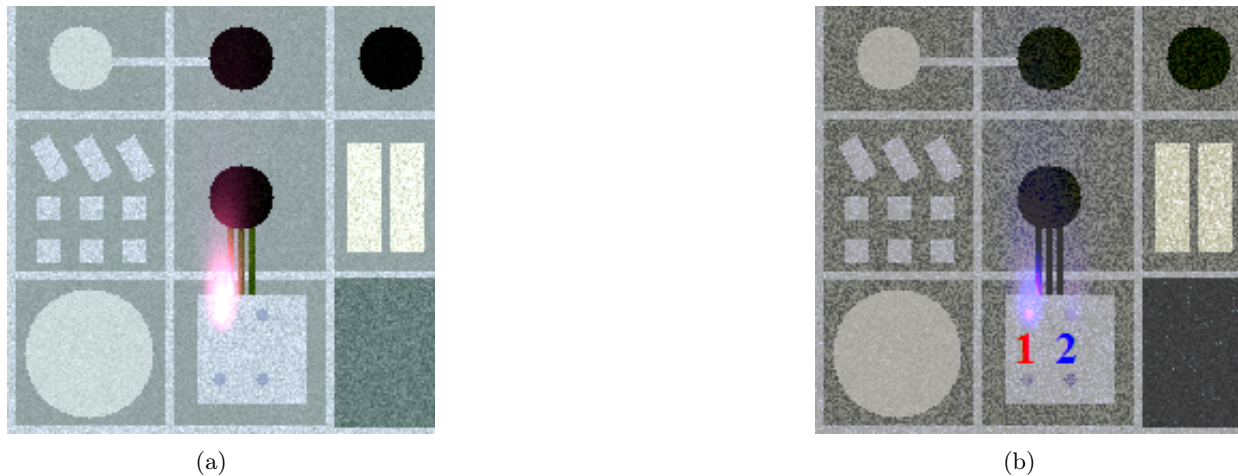


FIGURE 2.37 – Scène d'une raffinerie générée par notre simulateur dans la bande MWIR ($3 - 5\text{ }\mu\text{m}$). Images en RGB des trois bandes $3.39, 3.45$ et $4.94\text{ }\mu\text{m}$. (a) : Scénario 1a : émission du CO , SO_2 , CH_4 et NO_2 . (b) : Scénario 1b : émission du CO et SO_2 à partir des deux cheminées.

Dans la figure 2.37 deux images RGB ont été construites afin d'illustrer la présence du panache dans les images synthétiques de la raffinerie. Sur ces images les canaux RGB représentent respectivement les bandes spectrales : $3.39, 3.45$ et $4.94\text{ }\mu\text{m}$. Ces bandes ont été choisies de telle sorte d'illustrer

la présence des gaz CH_4 , NO_2 et CO , qui signent dans au moins une de ces bandes spectrales comme nous pouvons le voir sur la figure 2.38. Cette figure illustre les absorbances des différents gaz présents dans nos scénarii de même que celles des gaz atmosphériques (H_2O et CO_2).

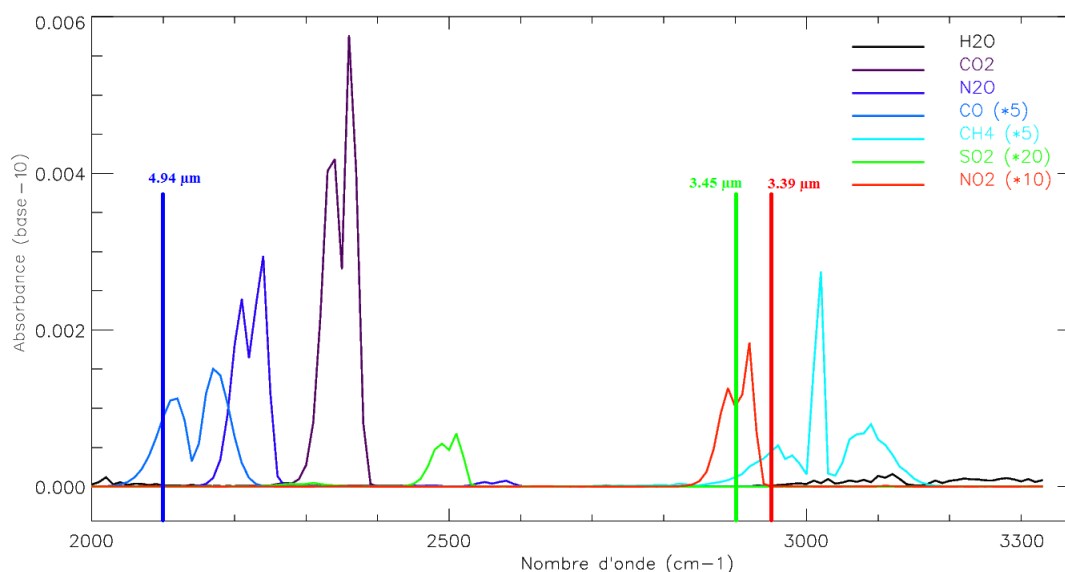


FIGURE 2.38 – Absorbances des gaz présents dans nos images synthétiques dans la bande spectrale MWIR (3 – 5 μm) (source : données PNNL).

Sur la figure du scénario 1a de la raffinerie (figure 2.37-(a)) le panache apparaît en blanc au centre et rouge lorsqu'on s'éloigne de la source. Au voisinage de la source les trois gaz sont en concentration suffisante pour être vus sur l'image RGB. En s'éloignant de la source, les concentrations décroissent ; seule la concentration du CH_4 (bande rouge) reste suffisamment importante pour être vue. Par ailleurs, pour la figure 2.37-(b) (scénario 1b de la raffinerie) les deux panaches apparaissent légèrement en violet. Dans ce cas le CO a une concentration très faible par rapport au scénario 1a, mais reste encore visible pour les bandes sélectionnées.

Pour illustrer la présence des gaz du panache (CO , SO_2 , NO_2 et CH_4) dans la bande MWIR, les spectres en température de brillance de quatre pixels de la scène de raffinerie (scénario 1a) ont été représentés dans la figure 2.39. L'image 2.39-(a) montre les spectres de deux pixels de la classe de sol « pavé de ciment ». Le pixel en rouge a été pris dans la zone hors panache ; tandis que le pixel bleu est pris sous le panache. Les signatures des quatre gaz présents dans le panache sont bien visibles sur le spectre de ce deuxième pixel.

L'image 2.39-(b) montre, quant à elle, les spectres de deux pixels de la classe de sol « Métal cuivre 10 ans ». Nous remarquons bien que les gaz du panache (CO , SO_2 , NO_2 et CH_4) signent pour le spectre du pixel bleu (présence du panache) ; contrairement au pixel rouge (absence du panache).

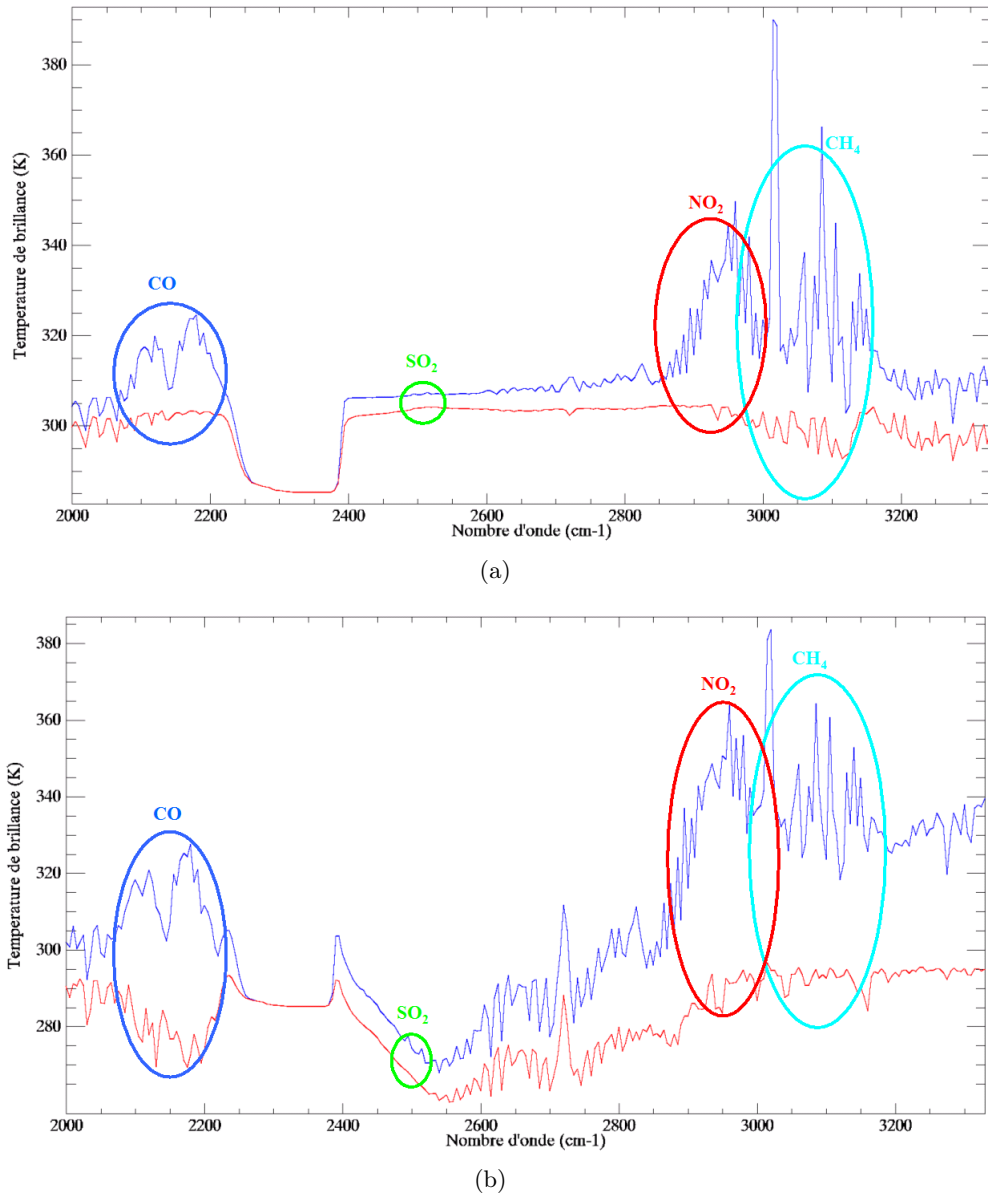


FIGURE 2.39 – Spectres en températures de brillance de quatre pixels de la scène de raffinerie (scénario 1a) illustrant la présence des gaz (CO , SO_2 , NO_2 et CH_4) en bande MWIR. Les spectres en rouge représentent des pixels hors panache ; tandis que les pixels bleus sont dans le panache. (a) Les deux pixels de cette image correspondent à un sol en pavé de ciment. (b) Les deux pixels de cette image correspondent à un sol en cuivre.

Résultats de la bande LWIR

Parmi les gaz émis dans nos scènes synthétiques, seulement le SO_2 , NH_3 , NO_2 et le N_2O signent spectralement dans la bande LWIR ($7.5 - 12.5 \mu\text{m}$). Pour illustrer la génération de scènes contenant ces gaz, nous allons montrer les résultats obtenus avec les deux scénarii de la raffinerie (1a et 1b). Les gaz présents dans ces deux scènes sont : le SO_2 , le NH_3 et le NO_2 .

La figure 2.40 présente deux images RGB construites dans le but d'illustrer les panaches présents dans les scènes de la raffinerie. Les canaux RGB de ces deux images, choisis de manière à mettre en évidence le SO_2 et le NH_3 , représentent respectivement les bandes spectrales : $8.58, 10.36$ et $12.19 \mu\text{m}$. La bande $8.58 \mu\text{m}$ permet de visualiser la présence du SO_2 ; tandis que la bande $10.36 \mu\text{m}$ présente un pic d'absorption du NH_3 , ainsi ce gaz sera visible pour cette bande. La dernière bande a été choisie parce qu'elle permet de visualiser le NO_2 . Sur la figure 2.41 nous avons représenté les courbes d'absorbance des gaz d'intérêt et celle de la vapeur d'eau.

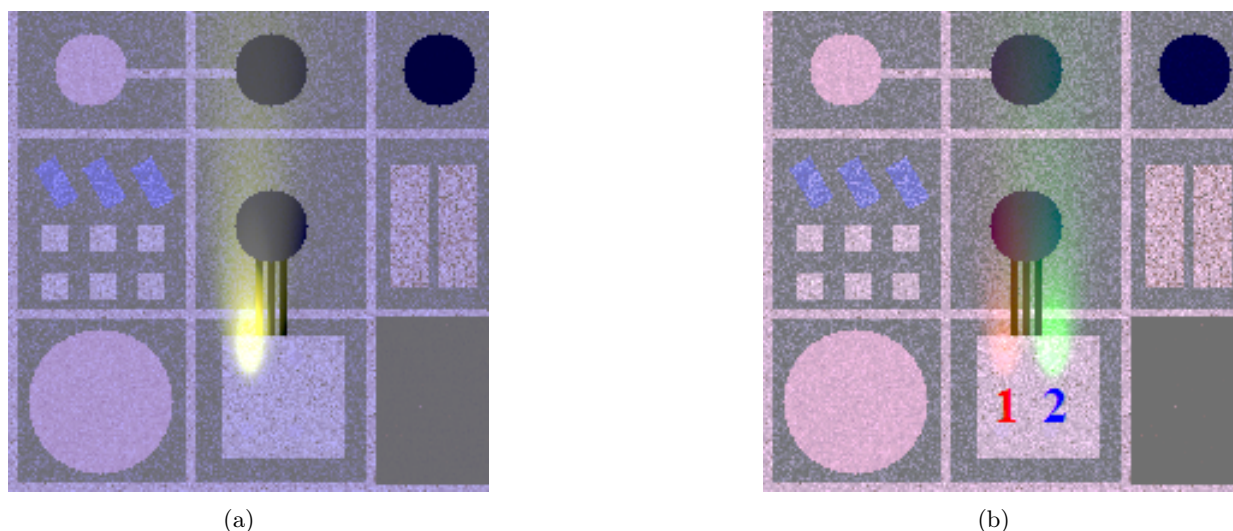


FIGURE 2.40 – Scène d'une raffinerie générée par notre simulateur dans la bande LWIR ($7.5 - 12.5 \mu\text{m}$). Images en RGB des trois bandes $8.58, 10.36$ et $12.19 \mu\text{m}$. (a) : Scénario 1a : émission du SO_2 , NH_3 et du NO_2 . (b) : Scénario 1b : émission du SO_2 et du NH_3 .

Sur l'image 2.40-(a), représentant le scénario 1a de la raffinerie, le panache apparaît en blanc au voisinage de la source, puis en s'éloignant de la source la couleur passe au jaune. Ce qui signifie la présence du SO_2 (canal rouge) et du NH_3 (canal vert). La concentration du NO_2 n'est pas suffisamment importante pour que ce gaz soit visible loin de la source du panache. Pour le scénario 1b de la raffinerie, la cheminée 1 émet un débit de 110 kg/h en SO_2 et un débit de 1.15 kg/h en NH_3 . Ainsi sur l'image 2.40-(b) le panache émis par cette cheminée apparaît en rouge (couleur représentative du SO_2). Par ailleurs, la cheminée 2 émet le même débit pour ces deux gaz (17 kg/h). Étant donnée que l'absorbance du NH_3 pour la bande $10.36 \mu\text{m}$ est 10 fois plus importante que celle du SO_2 à

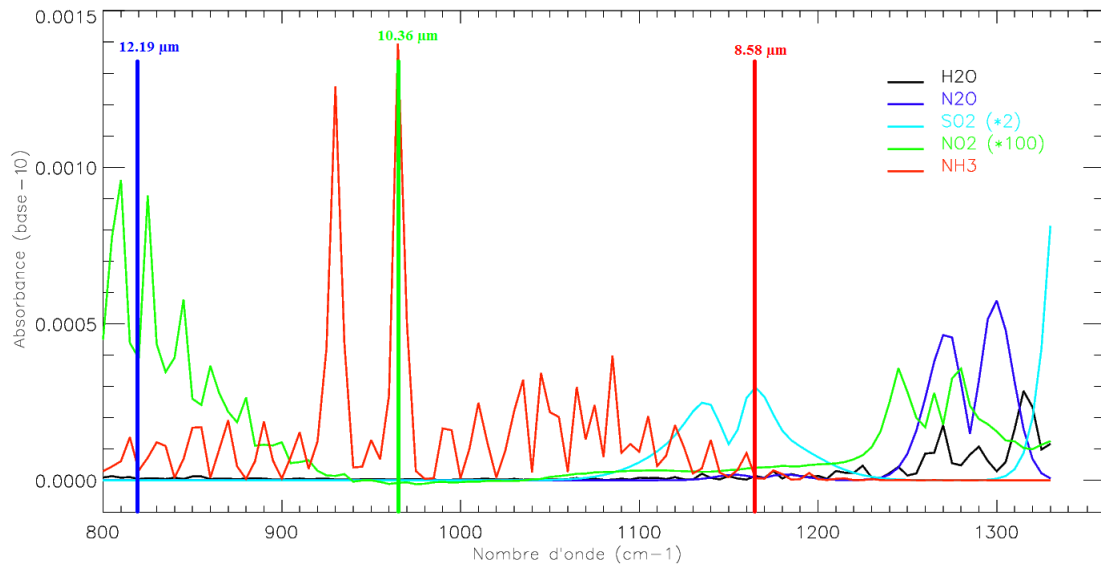


FIGURE 2.41 – Absorbances des gaz présents dans nos images synthétiques dans la bande spectrale LWIR (7.5 – 12.5 μm) (source : données PNNL).

8,10 μm : le NH_3 est le gaz le plus visible pour le panache de la cheminée 2. Aussi, ce panache apparaît en vert sur l'image 2.40-(b).

Comme pour la bande MWIR, nous avons illustré (cf. figure 2.42) la présence de gaz (SO_2 et NH_3) en utilisant les spectres en température de brillance de quatre pixels de la scène de la raffinerie (scenario 1a). Sur l'image 2.42-(a) sont représentés les spectres de deux pixels, dont le sol est constitué de « pavé de ciment ». Le pixel avec le spectre rouge ne contient pas de panache tandis que le pixel bleu est dans la région sous le panache. Nous pouvons remarquer clairement la présence des deux gaz d'intérêt (SO_2 et NH_3).

D'autre part, l'image 2.42-(b) représente les spectres de deux pixels de la classe de sol « Métal cuivre 10 ans ». Le spectre rouge correspond à un pixel dans la zone hors panache, alors que le spectre bleu correspond à un pixel contenant du panache. Les signatures des deux gaz d'intérêt sont là encore bien visibles pour le spectre bleu du pixel contenant du gaz.

2.6 Conclusion

L'objectif de ce deuxième chapitre était de présenter les outils utilisés pour la génération des images hyperspectrales en bande MWIR et LWIR de scènes industrielles synthétiques. L'intérêt est double : d'une part ces images permettront de combler le manque de données hyperspectrales pour l'étude des panaches industriels. En effet, les images dont nous disposons actuellement n'incluent pas toutes les vérités terrains nécessaires à une étude complète des panaches. D'autre part, une étude de sensibilité de la quantification des gaz par rapport aux différents paramètres du problème pourra

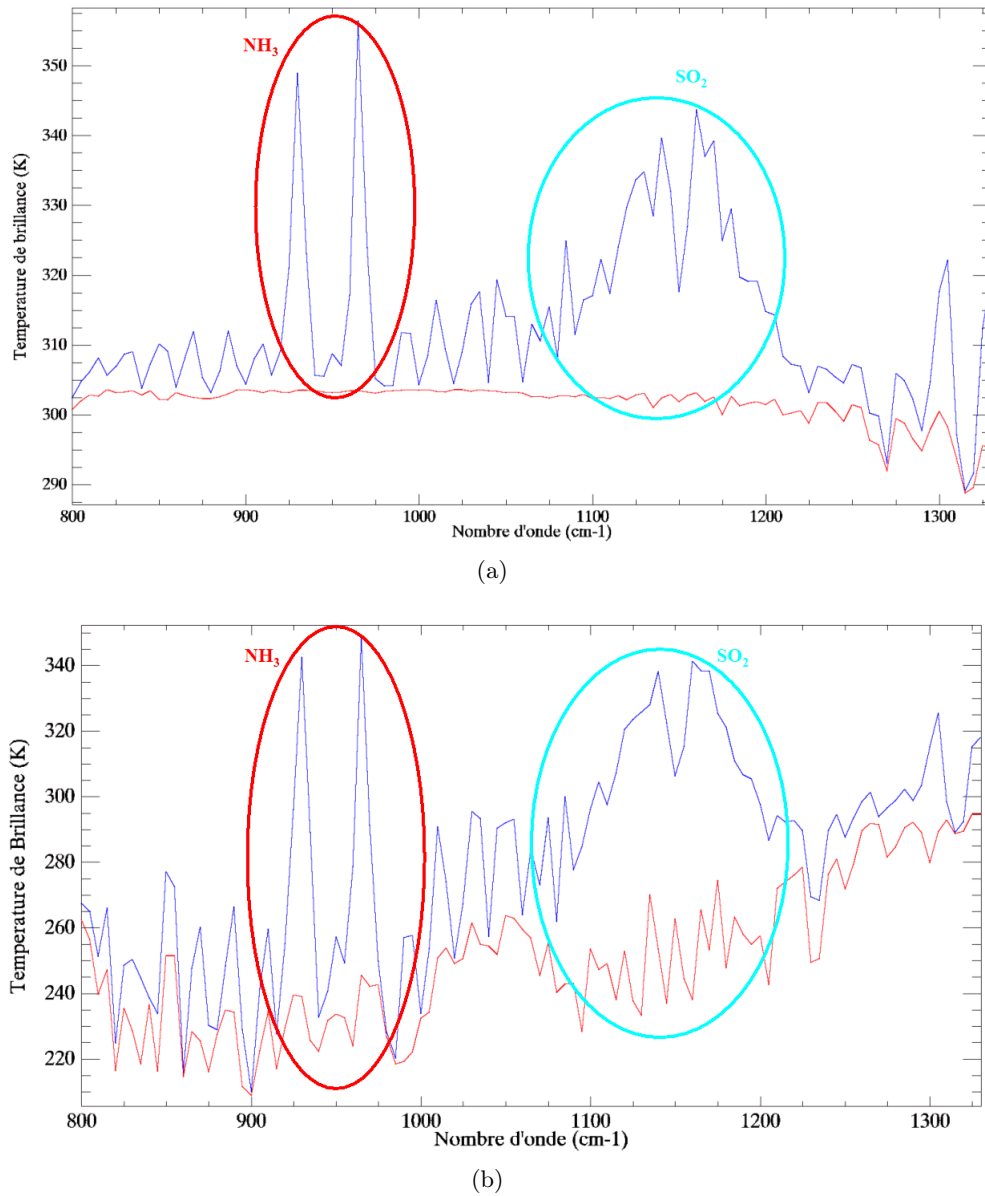


FIGURE 2.42 – Spectres en températures de brillance de quatre pixels de la scène de raffinerie (scénario 1a) illustrant la présence des gaz (NH_3 et SO_2) en bande LWIR. Les spectres en rouge représentent des pixels hors panache ; tandis que les pixels bleus sont dans le panache. (a) Les deux pixels de cette image correspondent à un sol en pavé de ciment. (b) Les deux pixels de cette image correspondent à un sol en cuivre.

être effectuée à partir des images hyperspectrales synthétiques.

Notre démarche a consisté à définir pour chaque pixel les paramètres liés à sa surface de sol, à ses profils atmosphériques et aux gaz du panache qu'il contient. Puis de réaliser un calcul de transfert radiatif permettant de déterminer la luminance en entrée du capteur aéroporté pour ce pixel.

En ce qui concerne la modélisation du sol de la scène, nous avons établi une carte de répartition des matériaux dans celle-ci, en partant de vrais sites industriels. Nous avons ensuite affecté à chaque pixel une température et une émissivité de surface. Pour cela nous nous sommes basés sur des acquisitions effectuées lors de la campagne de mesures CAPITOU (pour la température), et sur la base de données ASTER (pour l'émissivité).

Par ailleurs, nous avons détaillé les différentes méthodes permettant de choisir le profil atmosphérique pour notre modèle. Ensuite, nous nous sommes intéressés à la modélisation de la dispersion des panaches industriels de gaz. Ainsi, après avoir présenté les trois grandes familles de modèles de dispersion des gaz, nous avons expliqué l'approche que nous avons suivie pour introduire un panache de gaz dans nos scènes synthétiques.

Dans ce chapitre, nous avons aussi exposé une étude comparative entre deux codes de transfert radiatif : 4A et MODTRAN. Cette étude a permis de montrer que les deux codes ne donnent pas exactement les mêmes résultats. Néanmoins, la différence entre 4A et MODTRAN étant assez faible (écart moyen inférieur à 0.1 K en température de brillance), nous avons choisi de travailler avec MODTRAN, pour sa simplicité de mise en œuvre et pour sa vitesse d'exécution.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à l'analyse des résultats obtenus avec notre simulateur d'images hyperspectrales de scènes industrielles synthétiques (raffinerie, cimenterie et déchetterie). En particulier, nous avons illustré la présence des panaches pour certaines scènes. Puis, nous avons mis en évidence la signature des gaz présents, en juxtaposant les spectres de pixels contenant du gaz avec des pixels sans panache ayant les mêmes caractéristiques.

Le chapitre suivant sera consacré à l'état de l'art des méthodes de détection et de quantification des panaches, en utilisant l'imagerie hyperspectrale infrarouge. Il sera l'occasion pour nous de comparer les méthodes existantes et d'en déduire leurs limitations, afin de définir une stratégie de quantification des panaches permettant d'apporter une amélioration à ces limitations.

Chapitre 3

Caractérisation des panaches industriels par imagerie hyperspectrale

Sommaire

3.1	Introduction	81
3.2	Méthodes de détection de panaches par imagerie hyperspectrale	82
3.2.1	Introduction	82
3.2.2	Présentation des différentes méthodes	83
3.2.3	Application à des données réelles	87
3.2.4	Comparaison des résultats	94
3.3	Outils et traitements préliminaires à la quantification de panache par imagerie hyperspectrale	96
3.3.1	Introduction	96
3.3.2	Caractérisation du fond atmosphérique : correction atmosphérique	97
3.3.3	Caractérisation des propriétés de surfaces	99
3.3.4	Conclusion	101
3.4	Méthodes de quantification de panache par imagerie hyperspectrale	102
3.4.1	Introduction	102
3.4.2	Approche linéaire	102
3.4.3	Approche non-linéaire	107
3.4.4	Comparaison et limitations des différentes méthodes	112
3.5	Conclusion	121

3.1 Introduction

Le processus de caractérisation des panaches industriels consiste à détecter la présence des espèces chimiques d'intérêt, afin de les identifier puis de les quantifier (cf. figure 3.1). Du point de vue du traitement de signal, le but est de développer des algorithmes permettant la détection, l'identification et la quantification des gaz, en utilisant des modèles mathématiques prenant en compte la physique du problème, le contexte des scènes et les caractéristiques des capteurs utilisés.

Comme nous l'avons détaillé dans les chapitres précédents, lorsque le rayonnement infrarouge traverse un nuage de gaz, sa composition spectrale est modifiée à la fois par la transmission du nuage

et son émission. Cette modification dépend des signatures spectrales des gaz, de la concentration et de la température. Ainsi, tous les algorithmes de caractérisation exploitent la différence entre les rayonnements mesurés par un capteur hyperspectral après avoir traversé une atmosphère contenant un panache et une atmosphère sans panache.

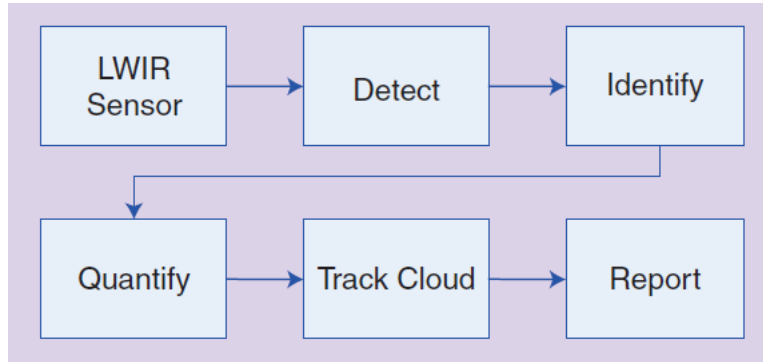


FIGURE 3.1 – Schéma illustrant les principales étapes de la caractérisation des panaches à partir des données hyperspectrales. (source [59]).

Dans la suite de ce chapitre, nous allons nous intéresser aux différentes méthodes développées dans la littérature afin de caractériser les panaches de gaz. Dans un premier temps, nous présenterons les méthodes de détection. Ensuite, nous aborderons quelques outils préliminaires à la quantification des gaz, en particulier la correction atmosphérique et la détermination des caractéristiques du sol. Enfin, nous détaillerons quelques approches de quantification de gaz.

Contrairement à ce qu'on pourrait rencontrer dans la littérature (cf. [59]), nous ne nous sommes pas focalisés sur l'identification des gaz en tant qu'étape indépendante dans le processus de caractérisation des panaches. En effet, nous avons considéré que l'identification des espèces présentes dans le panache était une tâche à effectuer lors de la détection, puisque la majorité des algorithmes de détection sont supervisés et nécessitent de connaître la signature d'un gaz pour savoir s'il est présent dans la scène.

Notons par ailleurs que dans ce qui va suivre nous allons nous focaliser sur la bande spectrale LWIR ($7.5 - 12.5 \mu m$). La raison en est que tous les travaux que nous avons rencontrés dans la littérature utilisent uniquement cette bande.

3.2 Méthodes de détection de panaches par imagerie hyperspectrale

3.2.1 Introduction

Il existe différents outils permettant de détecter la présence des gaz dans une scène, à partir des images hyperspectrales. Il s'agit pour la plupart de méthodes supervisées, dans la mesure où elles nécessitent des connaissances *a priori* sur les gaz, typiquement les signatures spectrales des gaz

recherchés. Nous avons examiné quelques unes de ces méthodes afin de sélectionner la plus adaptée à l’observation aéroportée. Cette dernière sera utilisée comme première étape dans notre démarche de caractérisation des panaches industriels. Dans ce qui suit, nous commencerons par une présentation des méthodes testées. Ensuite, nous analyserons les résultats obtenus sur des données réelles. La discussion de ces résultats permettra de choisir l’approche de détection qui sera retenue pour la suite.

3.2.2 Présentation des différentes méthodes

Spectral Angle Mapper (SAM)

La méthode du Spectral Angle Mapper (SAM) est une technique empruntée du domaine de la classification hyperspectrale. Elle est basée sur le calcul de l’écart angulaire entre un spectre référence caractéristique de la cible et un pixel de l’image. Pour chacun des pixels de l’image \mathbf{X} , on calcule son écart angulaire α_{SAM} par rapport au spectre référence \mathbf{x}_c , selon la formule suivante :

$$\alpha_{SAM}(\mathbf{x}) = \arccos\left(\frac{\mathbf{x}_c \cdot \mathbf{x}^T}{\|\mathbf{x}_c\| \cdot \|\mathbf{x}\|}\right) \quad (3.1)$$

Si un pixel de l’image, avec son spectre \mathbf{x} , contient du gaz cible caractérisé par le vecteur \mathbf{x}_c (par exemple : le spectre d’absorption convolué par la fonction d’appareil), alors l’écart angulaire entre les deux vecteurs \mathbf{x} et \mathbf{x}_c sera proche de 0 (pixel noir sur l’image résultat). En effet, ces deux vecteurs seront alors quasiment colinéaires.

Principal Components Analysis (PCA)

L’analyse des composantes principales d’une scène hyperspectrale permet de détecter et de localiser les panaches ayant une concentration de gaz suffisamment importante. Ainsi, il est préconisé de faire appel à cette méthode lors d’une étude préliminaire [60], afin de décider de la pertinence d’une approche plus poussée.

Le principe de cette méthode est de transformer un ensemble de données corrélées, par changement de repère (rotation), en un système de données décorrélées. Dans notre cas, on cherche à séparer l’espace des spectres représentant une atmosphère sans panache de ceux qui en contiennent [20].

Prenons une image hyperspectrale constituée de N pixels, chacun représenté par son spectre $\mathbf{x}(\lambda)$ et de J bandes spectrales. L’image peut alors être décrite par une matrice \mathbf{X} de taille $N \times J$. La matrice des covariances $\Sigma_{\mathbf{X}}$ de la matrice \mathbf{X} est estimée selon l’expression suivante :

$$\Sigma_{\mathbf{X}} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\mathbf{x}_n - \langle \mathbf{x} \rangle) (\mathbf{x}_n - \langle \mathbf{x} \rangle)^T \quad (3.2)$$

avec $\langle \mathbf{x} \rangle$ le spectre moyen sur toute l'image. Afin de décorréler les données les unes des autres, il suffit de diagonaliser la matrice des covariances. Les données décorréélées sont obtenues à partir des données initiales par la formule ci-dessous :

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \quad (3.3)$$

où la matrice \mathbf{A} est la matrice de passage vers la base des vecteurs propres, ordonnés par ordre décroissant des valeurs propres. La nouvelle matrice des covariances $\Sigma_{\mathbf{Y}}$ exprimée dans la base des vecteurs propres est diagonale.

Après le calcul de la matrice \mathbf{A} par diagonalisation de la matrice des covariances, l'image \mathbf{X} est projetée sur chacune des colonnes de \mathbf{A} (vecteurs propres de la diagonalisation). Ce qui nous permet d'obtenir les N composantes principales de l'image \mathbf{X} . La i^{eme} composante principale s'exprime :

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{A}_i^T \cdot \mathbf{X} \quad (3.4)$$

\mathbf{A}_i est la i^{eme} colonne de la matrice \mathbf{A} . La matrice \mathbf{Y}_i obtenue contient la projection de chacun des pixels sur la i^{eme} composante principale.

La détection de panaches par analyse des composantes principales, s'effectue simplement en cherchant des structures géométriques de panaches sur les différentes matrices \mathbf{Y}_i .

Spectral Matched Filter (SMF)

La méthode des filtres spectraux adaptés est une approche très utilisée dans la détection de cibles à l'intérieur d'une image hyperspectrale. Le principe de cette approche réside dans l'utilisation d'une signature spectrale caractéristique de chacune des cibles, afin de détecter sa présence dans l'image. La signature de référence est soit issue d'une bibliothèque soit obtenue par un apprentissage sur l'image. Plusieurs méthodes d'implémentation de cette approche sont employées dans le domaine de la détection des panaches.

Pour l'implémentation la plus rencontrée dans la littérature [20], on commence par calculer la matrice des covariances $\Sigma_{\mathbf{X}}$ de l'image \mathbf{X} en utilisant la formule (3.2). On définit, par ailleurs, la matrice \mathbf{T} des K spectres représentant les signatures des cibles. Ces spectres sont spécifiés par l'utilisateur (*méthode supervisée*). Dans notre étude, ces spectres ont été sélectionnés à partir des mesures d'absorbance des gaz effectuées par le PNNL.

Pour le i^{me} pixel de l'image \mathbf{X} , décrit par son spectre \mathbf{x}_i , le modèle linéaire par rapport aux spectres caractéristiques des gaz cibles s'écrit :

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{T} \cdot \mathbf{a} + \mathbf{d} \quad (3.5)$$

Avec \mathbf{a} un vecteur de K éléments correspondant à l'abondance des K spectres cibles dans le pixel \mathbf{x}_i , \mathbf{d} est un vecteur résiduel que nous cherchons à minimiser. La solution analytique à cette

régression s'écrit :

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{T}^T \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{X}}^{-1} \mathbf{x}}{\mathbf{T}^T \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{X}}^{-1} \mathbf{T}} \quad (3.6)$$

Avec cette formulation du problème, les colonnes de la matrice $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{X}}^{-1} \mathbf{T}$ sont les « filtres adaptés » de chacune des cibles.

En calculant le coefficient d'abondance (\mathbf{a}) pour chaque pixel, on obtient une carte de répartition des gaz dans l'image. Il suffit alors d'appliquer un seuil permettant de classifier l'image en deux zones selon la présence ou non des espèces chimiques recherchées.

Une amélioration des performances de cet algorithme peut être obtenue en modifiant le calcul de la matrice des covariances ($\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{X}}$), de sorte que les pixels contenant du panache ne soient pas pris en compte [61].

Funk et al. [62] montrent qu'une amélioration du SMF peut être obtenue en réalisant une classification préalable de la scène. Puis d'appliquer le SMF à chacune des classes. Ainsi, pour chaque classe une matrice de covariance sera calculée. Cette approche ne sera pas toujours faisable dans notre cas, dans la mesure où il est très difficile de classifier une scène contenant du panache.

Generalised Likelihood Ratio Test (GLRT)

La méthode du test du maximum de vraisemblance (GLRT) [20], est assez proche de la méthode que nous venons de présenter ci-dessus. Dans ce cas un pixel \mathbf{x}_i de l'image est décrit en intégrant sa décomposition selon une base de l'arrière-plan (sol + atmosphère sans panache) :

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{T} \cdot \mathbf{a} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{b} + \epsilon \quad (3.7)$$

Où \mathbf{B} est la base de spectres décrivant l'arrière-plan. Cette matrice peut être calculée en utilisant les premières composantes principales de l'image, en suivant la même démarche que pour la PCA. \mathbf{a} et \mathbf{b} sont les coefficients d'abondance des spectres des cibles et de l'arrière-plan dans le pixel, et ϵ est le vecteur résiduel permettant de prendre en compte les erreurs de modélisation et sur les données. Les hypothèses du test s'écrivent alors :

$$\begin{cases} H_0 : \mathbf{a} = \mathbf{0} & \text{En absence de gaz cibles,} \\ H_1 : \mathbf{a} \neq \mathbf{0} & \text{En présence de gaz cibles.} \end{cases} \quad (3.8)$$

L'opérateur de la vraisemblance généralisée (GLR) correspond au rapport entre la probabilité de H_0 sur la probabilité de H_1 [63], sous les hypothèses que l'erreur ϵ suit une loi normale multi-variée et que les matrices \mathbf{T} et \mathbf{B} sont connues et indépendantes. Il est basé sur la statistique suivante :

$$GLR(\mathbf{x}) = \left[\frac{\mathbf{x}^T \mathbf{P}_{\mathbf{B}}^{\perp} \mathbf{x}}{\mathbf{x}^T \mathbf{P}_{\mathbf{Z}}^{\perp} \mathbf{x}} \right]^{\frac{J}{2}} \quad (3.9)$$

Où $\mathbf{Z} = [\mathbf{T}, \mathbf{B}]$ est la matrice construite par concaténation des colonnes de \mathbf{T} et de \mathbf{B} . En outre, la matrice $\mathbf{P}_{\mathbf{Y}}^{\perp}$ est obtenue par la projection de toutes les colonnes de la matrice \mathbf{Y} (\mathbf{B} ou \mathbf{Z}) sur leur

espace orthogonal. Ainsi, on a :

$$\mathbf{P}_{\mathbf{Y}}^{\perp} = \mathbf{I} - \mathbf{Y} (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y})^{-1} \mathbf{Y}^T \quad (3.10)$$

La fonction statistique GLR peut alors s'écrire comme étant une fonction monotone de l'opérateur MSD (matched subspace detector). Ce dernier permet de détecter les sous-espaces correspondant aux cibles. Il est décrit par la formule suivante :

$$\begin{aligned} MSD(\mathbf{x}) &= \frac{\mathbf{x}^T (P_B^{\perp} - P_Z^{\perp}) \mathbf{x}}{\mathbf{x}^T P_Z^{\perp} \mathbf{x}} \\ GLR(\mathbf{x}) &= [MSD(\mathbf{x}) + 1]^{\frac{J}{2}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

La détection de panache par cette méthode se fait simplement par l'introduction d'un seuil à la fonction statistique GLR.

Choix du seuillage

Les différentes méthodes que nous venons de présenter, nécessitent l'application d'un seuillage sur l'image obtenue en sortie. C'est ce seuillage qui nous permettra d'avoir un masque de la zone contenant du panache.

Dans notre analyse comparative de ces méthodes, nous n'avons pas fixé le même seuil pour toutes les méthodes ni pour les différentes applications de chacune d'entre elles. Cependant nous avons suivi la même procédure pour déterminer les différents seuils.

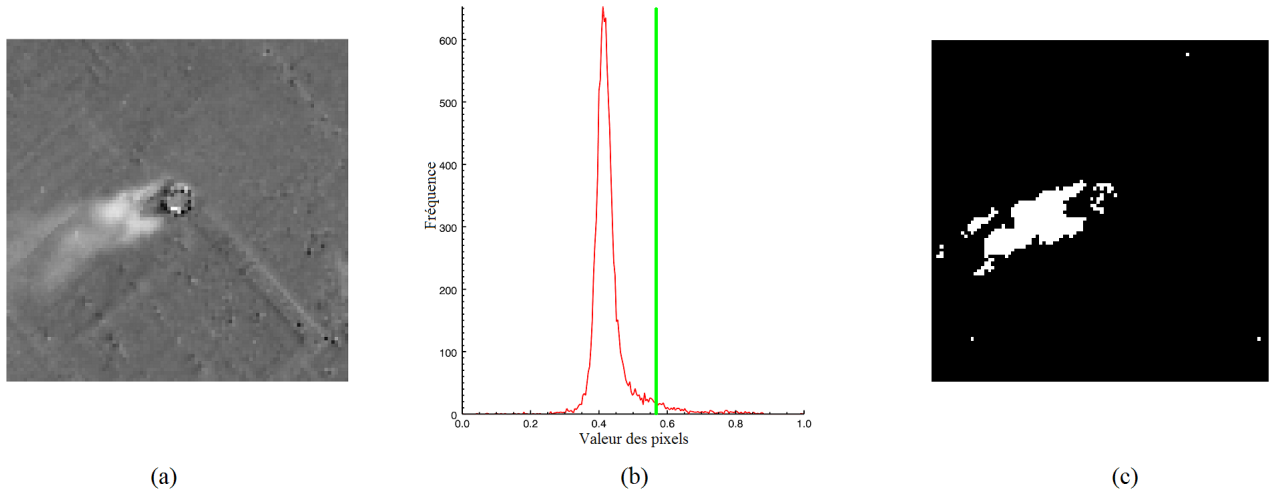


FIGURE 3.2 – Illustration de la démarche de définition du seuil. (a) Image obtenue après application de la méthode SMF. (b) Histogramme réalisé sur l'image à gauche, le trait vert montre le seuil sélectionné pour la détection du panache. (c) Masque obtenu avec un seuillage à 0.57 : On élimine les pixels avec un indice inférieur à 0.57.

Cette procédure est basée sur une analyse de l'histogramme de l'image obtenue par l'un des algorithmes présentés ci-dessus. Nous avons remarqué, en effet, que tous les histogrammes obtenus

présentent une forme gaussienne. En outre, nous avons constaté que pour isoler le panache, il fallait fixer le seuil au pied de la gaussienne comme on peut le constater sur la figure 3.2, car la majorité des pixels de l'image sont hors panache. Sur l'histogramme ces pixels se retrouvent dans la gaussienne. Le seuil est alors choisi visuellement à partir de l'histogramme. Pour réduire le taux de fausses détections, on applique des opérations de morphologie mathématique, en occurrence des ouvertures morphologiques. Ces opérations visent à éliminer les pixels blancs isolés (cf. figure 3.2-(c)).

3.2.3 Application à des données réelles

Présentation des données

Nous avons appliqué les méthodes précédentes pour détecter un panache de SO_2 émis par une cheminée de la raffinerie Jean Gaulin au Québec (cf. figure 3.3). L'image dont nous disposons a été acquise par l'organisme canadien RDDC (*Recherche et développement pour la défense Canada*), en utilisant l'instrument Telops Hyper-Cam-LW [64]. Elle a été prise avec une résolution spectrale de 5.85 cm^{-1} dans la bande spectrale LWIR ($[7.98 - 11.24 \text{ }\mu\text{m}]$).



FIGURE 3.3 – Images aériennes de la raffinerie Jean Gaulin au Québec. L'image de gauche est issue du site de Google Map. L'image de droite est une image RGB des bandes spectrales : 8.59, 10.35 et $11.24 \text{ }\mu\text{m}$ acquises par l'instrument de Telops. Le cadre rouge représente l'imagerie sur laquelle le SAM a été appliqué.

Application du SAM

Nous avons testé le SAM sur l'image Telops en utilisant plusieurs spectres de référence caractéristiques de la signature du SO_2 , afin de détecter l'émission de ce gaz par la cheminée. Nous avons retenu pour notre analyse six spectres. Le premier est le coefficient d'absorbance du SO_2 convolué par la fonction d'appareil (cf. figure 1.4). Les cinq autres sont représentés dans la figure 3.4.

Pour mieux comparer les images obtenues après application du SAM, nous avons effectué des seuillages sur ces dernières. A chaque fois, une analyse d'histogramme a permis de déduire le meilleur seuil à appliquer à l'image, afin de conserver la structure du panache, tout en éliminant au mieux

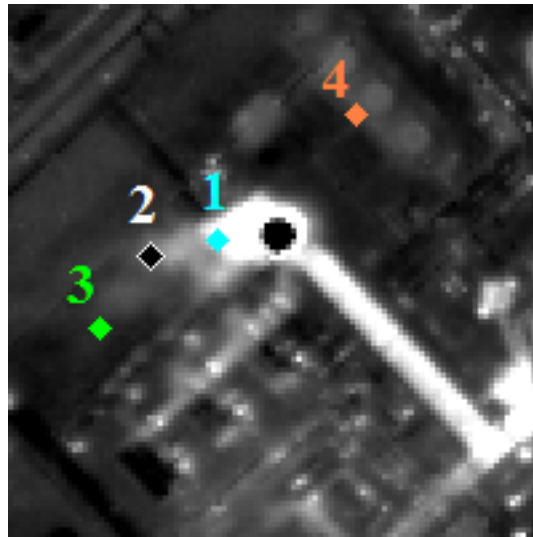
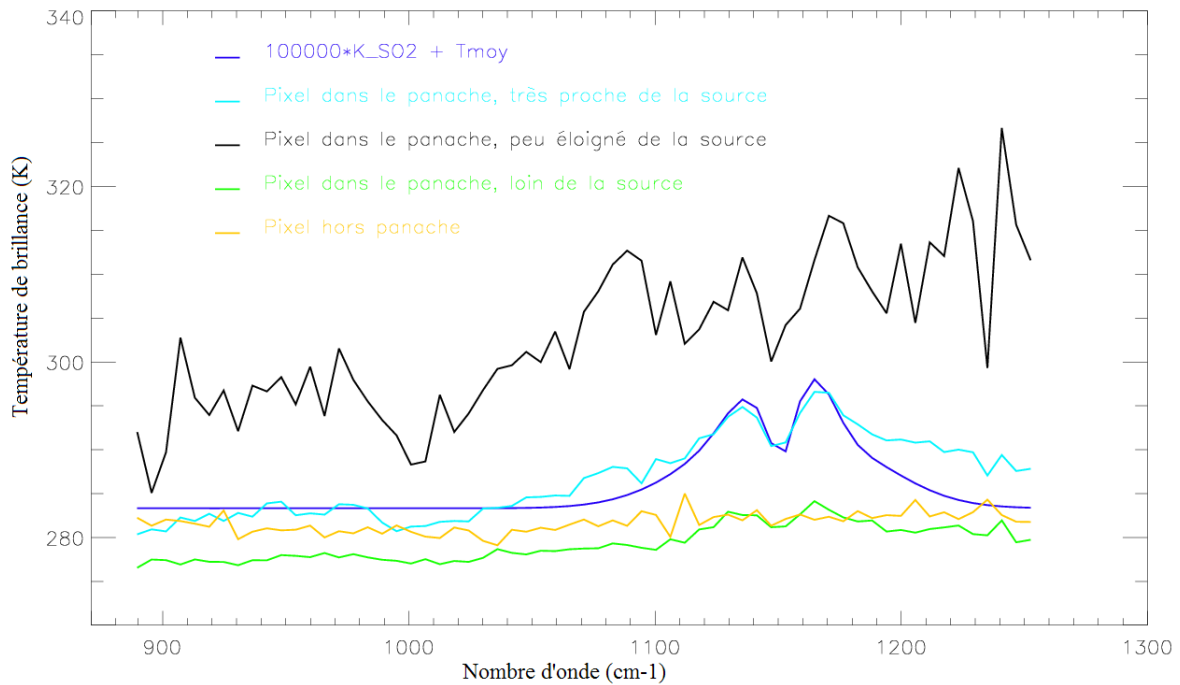


FIGURE 3.4 – En haut, cinq spectres de références utilisés pour la détection du SO_2 sur l'image de la raffinerie par le SAM : en bleu, un spectre déduit de l'absorbance du SO_2 afin d'approcher une température de brillance typique de l'image. En orange, un spectre tiré de l'image Telops en dehors du panache. Les trois autres spectres sont pris à partir de l'image à différents endroits du panache (en cyan le pixel est très proche de la source, en noir on s'éloigne un peu de la source, en vert le pixel est loin de la source). En bas, illustration du positionnement des pixels dont les spectres ont été utilisés pour l'application du SAM sur le site de la raffinerie.

les autres structures.

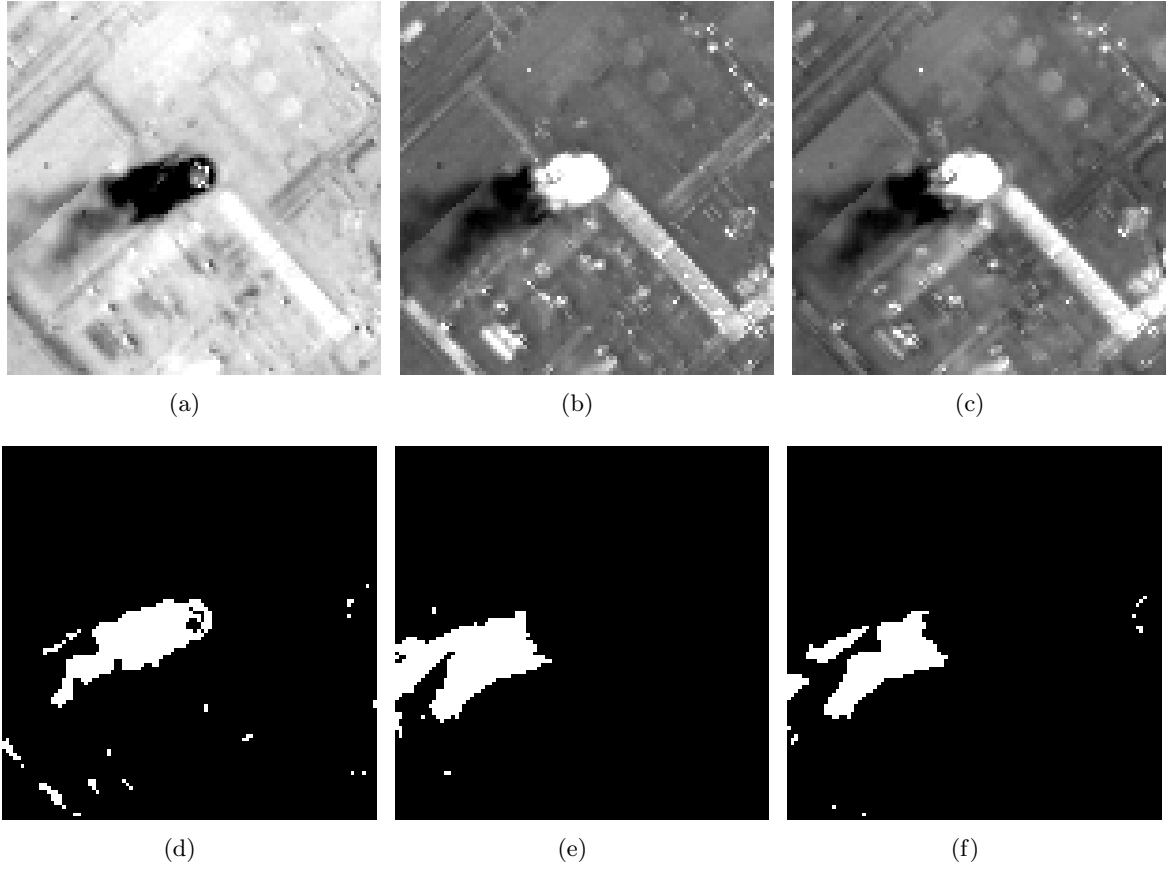


FIGURE 3.5 – Application du SAM sur l’image Telops de la raffinerie Jean Gaulin au Québec, contenant un panache de SO_2 : (a) : le spectre de référence est le coefficient d’absorption du SO_2 , (b) : le spectre de référence est obtenu par une transformation affine du coefficient d’absorption du SO_2 , (c) : le spectre du pixel $n^\circ 2$ du panache est pris comme spectre de référence. Les images (d), (e) et (f) sont obtenues à partir des trois premières après seuillage.

Le premier spectre utilisé correspond au coefficient d’absorption du SO_2 (cf. figure 1.4). Ce spectre permet d’avoir une bonne prise en compte de la signature du gaz cible. En revanche, il ne prend pas en compte les composantes de l’atmosphère et du sol dans le rayonnement reçu au niveau du capteur. Malgré cet inconvénient, ce spectre de référence donne une bonne détection du panache, comme on peut le voir sur la figure 3.5-(a),(d). Notons qu’avec ce spectre de référence, le coefficient $\alpha_{SAM}(\mathbf{x})$ est calculé en utilisant uniquement la bande du SO_2 ; puisque en dehors de celle-ci le spectre de référence est nul.

Le deuxième spectre est directement lié au coefficient d’absorption du SO_2 : ce spectre en température de brillance est obtenu par la formule : $\mathbf{x}_c = \alpha_T \cdot \kappa_{\text{SO}_2} + T_{\text{moy}}$ (avec T_{moy} la température de brillance moyenne sur l’image pour toutes les longueurs d’ondes, α_T est un coefficient multiplicatif égal à $10^5 \text{ K} \cdot \text{ppm} \cdot \text{m}$). L’intérêt de ce spectre est de permettre la modélisation d’un pixel moyen

du panache : avec $10^5 \text{ ppm} \cdot m$ de SO_2 pour un $\Delta T = 1 \text{ K}$ et une température de brillance égale à la température de brillance moyenne. L'introduction de T_{moy} permet de prendre en compte en partie les composantes de l'atmosphère et du sol, mais d'une manière assez sommaire.

En comparaison avec le premier spectre de référence, les résultats obtenus avec ce deuxième spectre (cf. figure 3.5-(b),(e)) mettent plus en évidence les pixels sous le panache qui sont éloignés de la source.

Le troisième correspond à un pixel de l'image dans la zone du panache (pixel n°2 sur la figure 3.4). Avec ce spectre, nous avons une meilleure prise en compte du rayonnement de l'atmosphère, qui est à peu près le même sur toute l'image. Cependant, étant donné la grande hétérogénéité spectrale du sol dans un site industriel, la composante due au sol dégrade un peu les performances de la détection. Ainsi un pixel hors panache, avec le même type de sol que le pixel de référence peut avoir une valeur de α_{SAM} inférieure à celle d'un pixel dans le panache mais ayant un sol très différent spectralement de celui de \mathbf{x}_c . Après un seuillage nous avons obtenu le masque (figure 3.5-(f)) qui fait apparaître de légères structures hors panache. Par rapport, aux résultats du spectre précédent (figures 3.5-(b),(e)), certains pixels dans le panache ne sont pas détectés dans ce cas.

Afin de voir l'impact du choix du pixel à utiliser comme vecteur référence sur la détection, nous avons appliqué le SAM avec quatre pixels différents de l'image (figure 3.4).

Un premier pixel hors panache (pixel n°4) donne une mauvaise détection du panache (figures 3.6-(a),(d)). Ce qui est dû à l'absence de la signature du SO_2 dans le spectre de référence utilisé dans ce cas.

Les trois autres pixels (n°1, n°2 et n°3) ont été pris le long du panache : Le pixel n°1 est proche de la source (cf. figures 3.6-(b),(e)), il ne permet pas de détecter les zones du panache qui sont éloignées de la source. De plus, plusieurs structures en dehors du panache ont une valeur de α_{SAM} très petite. Ce qui ne permet pas de les éliminer lors du seuillage.

Les deux autres pixels sont loin de la source (le pixel n°3 étant le plus éloigné). Les détections obtenues par ces deux spectres sont satisfaisantes. Le spectre du pixel n°3 (figures 3.6-(c),(f)) détecte mieux les pixels qui sont loin de la source ; tandis que le spectre du pixel n°2 (figures 3.5-(c),(f)) est légèrement meilleur pour la détection des pixels proches de la source.

En conclusion de cette comparaison, il faut noter que le choix du pixel référence semble être critique pour le résultat du SAM. La meilleure stratégie serait de concaténer les zones de panache obtenues par plusieurs pixels le long du panache, ou tout simplement en utilisant le coefficient d'absorption.

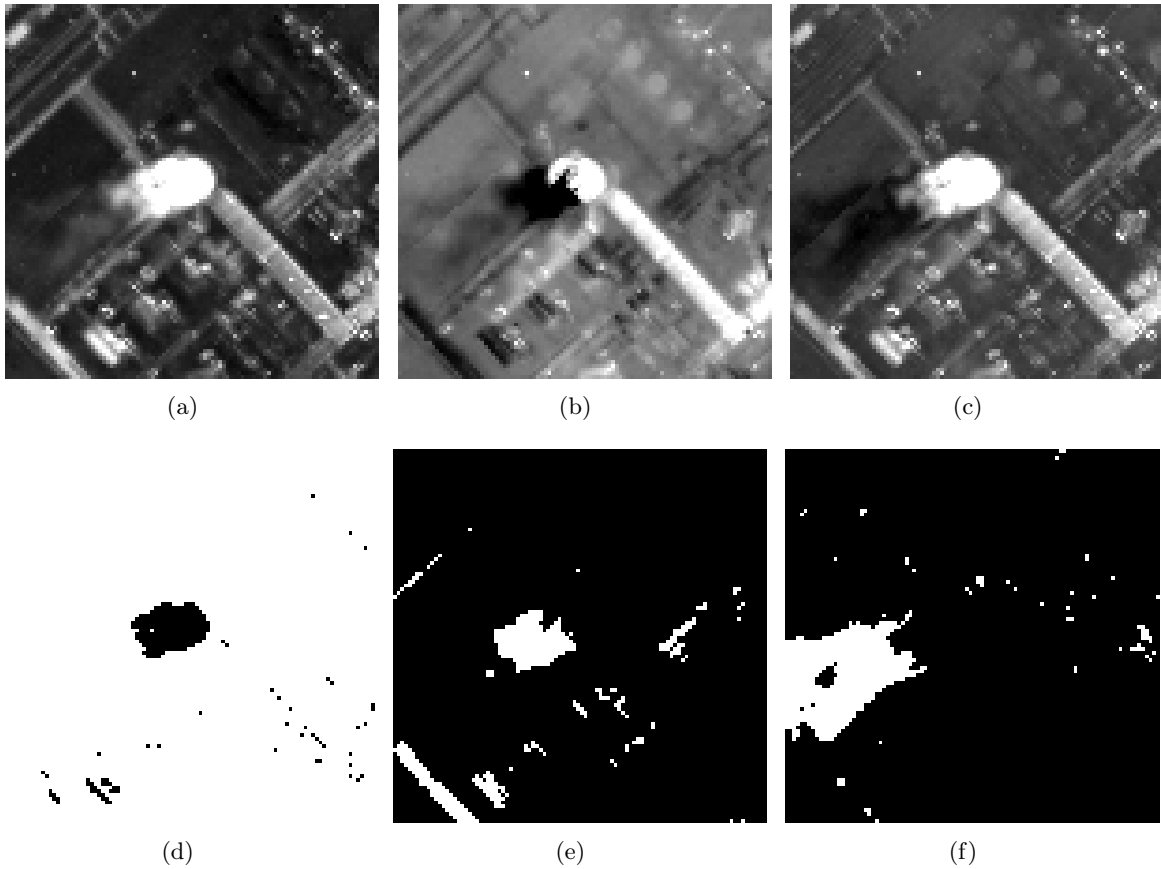


FIGURE 3.6 – Application du SAM sur l'image Telops de la raffinerie Jean Gaulin au Québec, contenant un panache de SO_2 : (a) : le spectre de référence est le spectre du pixel $n^\circ 4$ (hors panache), (b) : le spectre du pixel $n^\circ 1$ (sous le panache et proche de la source) est pris comme spectre de référence, (c) : le spectre du pixel $n^\circ 3$ (sous le panache et loin de la source) est pris comme spectre de référence. Les images (d), (e) et (f) sont obtenues à partir des trois premières après seuillage.

Application du PCA

Une détection du panache du SO_2 émis par la raffinerie du Québec, par analyse des composantes principales a été réalisée.

Le panache est clairement identifiable sur plusieurs des composantes principales, comme on peut le voir sur la figure 3.7.

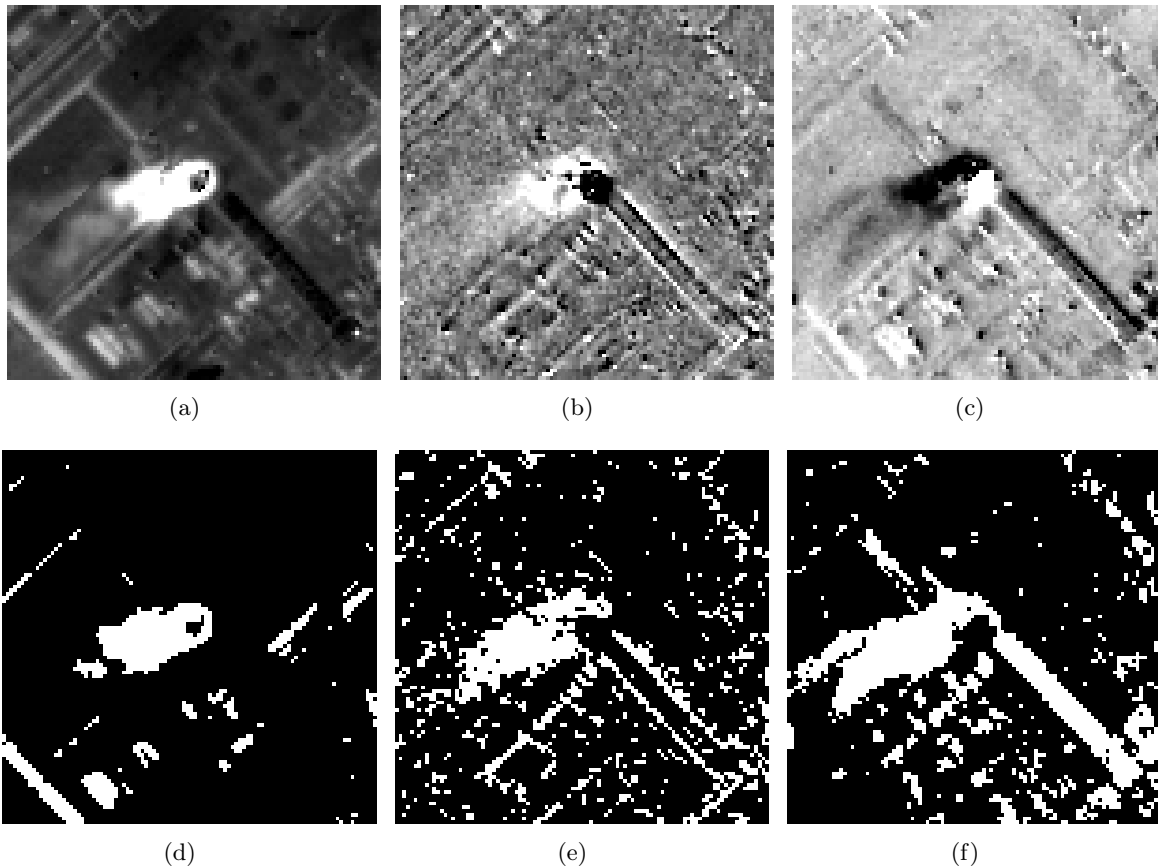


FIGURE 3.7 – Application du PCA sur l'image Telops de la raffinerie Jean Gaulin au Québec, contenant un panache de SO_2 : (a) projection de l'image Telops sur la 2^{ème} composante principale, (b) projection de l'image Telops sur la 42^{ème} composante principale, (c) projection de l'image Telops sur la 24^{ème} composante principale. Les images (d), (e) et (f) sont obtenues par seuillage à partir des trois premières.

Pour toutes les projections de l'image Telops sur les composantes principales, il est impossible de séparer complètement le panache des structures des installations de la raffinerie par un simple seuillage. De plus, cette technique de détection ne permet pas d'identifier les gaz présents dans le panache.

On comprend donc la raison pour laquelle cette méthode n'est utilisée que pour une étude préliminaire.

Application du SMF et du GLRT

Nous avons implémenté les deux algorithmes précédents (SMF et GLRT), afin de les tester sur l'acquisition Telops de la raffinerie Jean Gaulin. Dans les deux cas, la signature du SO_2 déduite de l'absorbance de celui-ci (données PNNL) a été prise comme base de l'espace des pixels contenant le panache. Nous avons aussi réalisé des tests avec d'autres bases (spectres de pixels à l'intérieur du panache), mais la détection n'était pas assez performante comme on peut le voir sur la figure 3.9. Cette figure illustre le résultat obtenu pour une détection SMF en prenant le spectre du pixel 1 (cf. figure 3.4) comme base.

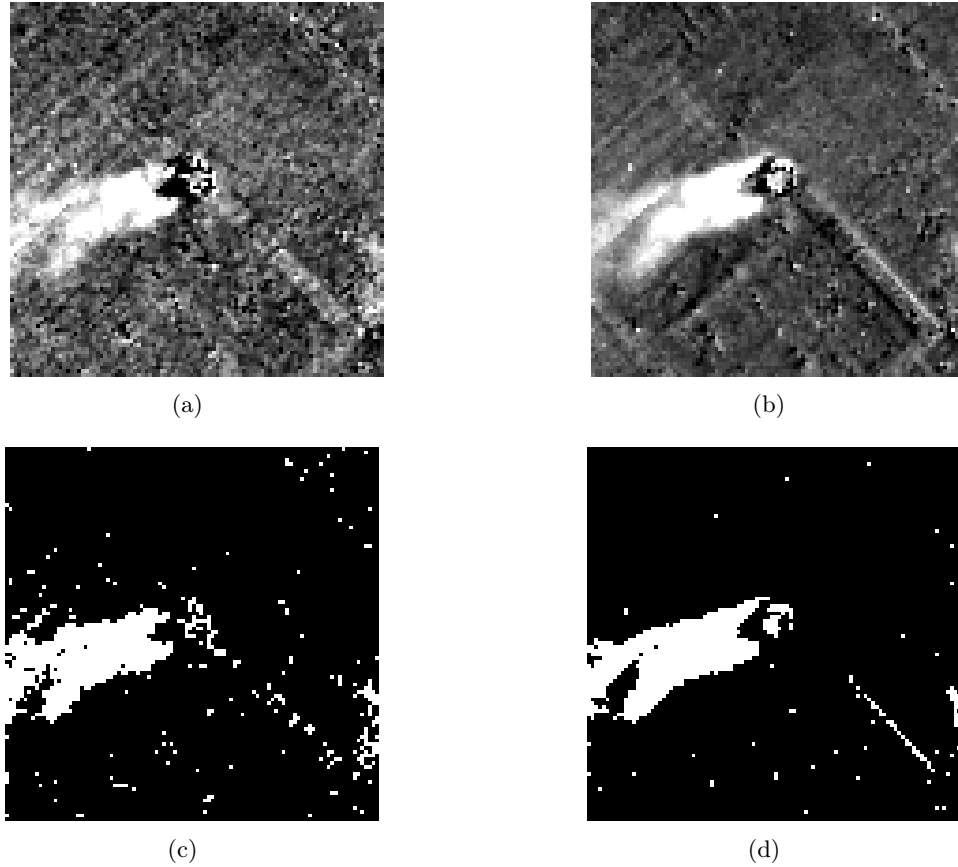


FIGURE 3.8 – Application du SMF sur l'image Telops de la raffinerie Jean Gaulin au Québec, contenant un panache de SO_2 : (a) Cas où la matrice des covariances a été calculée pour cette même zone de la raffinerie; (b) une zone de la raffinerie hors panache a été utilisée pour le calcul de la matrice des covariances. Les images (c) et (d) sont obtenues à partir des deux premières images après un seuillage.

Sur les figures 3.8 et 3.10, on constate que lorsque la matrice des covariances $\Sigma_{\mathbf{X}}$ est calculée sur une zone contenant le panache, la détection est moins efficace : l'image obtenue contient plus de bruit que pour le cas où le calcul de $\Sigma_{\mathbf{X}}$ s'effectue sur une zone sans panache. Ce bruit se répercute lors du seuillage, où on détecte des structures du sol avec le panache.

Notons qu'aussi bien pour le SMF que pour le GLRT, la détection du panache est réalisée par un

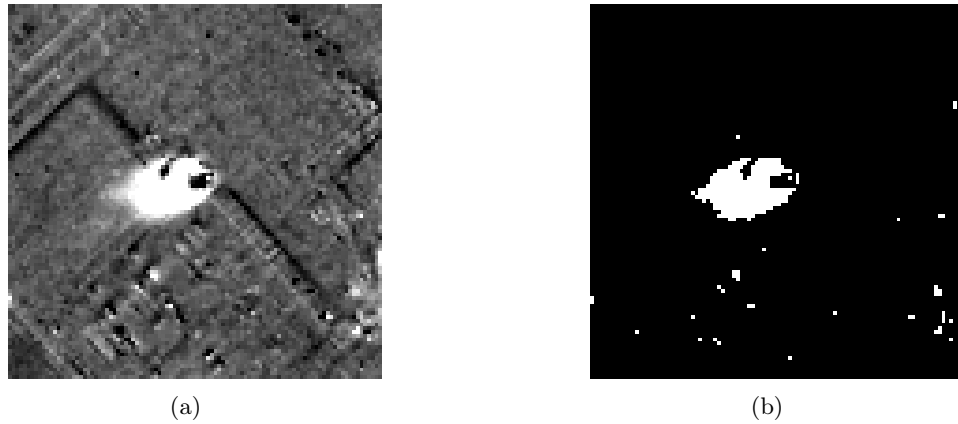


FIGURE 3.9 – Application du SMF sur l'image Telops de la raffinerie Jean Gaulin au Québec, contenant un panache de SO_2 : (a) en utilisant le spectre d'un pixel avec panache comme base de l'espace cible. (b) Seuillage réalisé sur la première image.

calcul d'une abondance. Plus cette abondance est grande et plus la quantité de gaz cible contenue dans le pixel est grande. On l'observe très bien sur les deux figures 3.8-(a), (b) et 3.10-(a), (b) : plus on s'éloigne de la cheminée et plus l'abondance décroît. Ces deux algorithmes offrent ainsi une première approche à la quantification du gaz contenu dans le pixel.

3.2.4 Comparaison des résultats

Le SAM est la méthode de détection la plus simple à mettre en place, et la plus rapide. Cependant elle n'est pas très robuste, vu que les résultats qu'elle fournit dépendent beaucoup du choix du vecteur de référence. Une amélioration consisterait à combiner les résultats de détections de plusieurs spectres de références. Ces spectres peuvent être pris le long du panache (ce qui n'est pas évident, étant donné qu'on cherche à retrouver le panache), ou en construisant des spectres à partir des absorbances des gaz cibles.

La deuxième méthode étudiée (PCA) est la seule qui est *a priori* non supervisée. Elle nécessite tout de même une intervention d'un opérateur afin de choisir les meilleures composantes, qui permettent de faire apparaître le panache après projection de l'image hyperspectrale.

Cette méthode de détection a deux limitations importantes [65] qui font qu'elle n'est pas très adaptée à notre problème. D'abord, la PCA se prête bien à l'analyse des images où l'arrière-plan associé aux sources de signal est un bruit blanc gaussien. Ce qui est rarement le cas des scènes industrielles. Par ailleurs, les panaches ont souvent une petite taille par rapport au reste de l'image, et par conséquent ils n'ont pas une grande contribution à la variance totale de l'image.

L'utilisation de la Poursuite de Projection (PP) ([65] et [20]) permet de pallier à ces deux limitations. La Poursuite de Projection consiste à faire des projections successives de l'image sur des

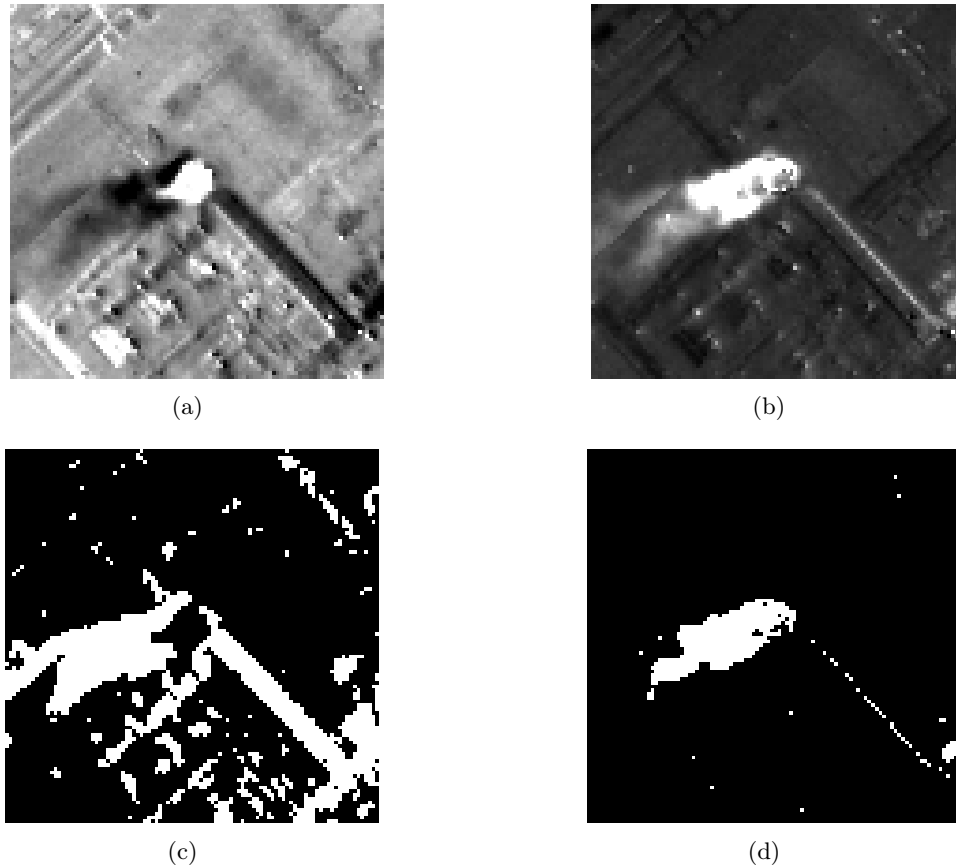


FIGURE 3.10 – Application du GLRT sur l'image Telops de la raffinerie Jean Gaulin au Québec, contenant un panache de SO_2 : (a) Cas où la matrice des covariances a été calculée pour cette même zone de la raffinerie. (b) Une zone de la raffinerie hors panache a été utilisée pour le calcul de la matrice des covariances. Les images (c) et (d) sont obtenues par seuillage à partir des deux premières.

spectres de pixels de celle-ci, jusqu'à parvenir à une projection optimale. Il s'agit de la projection qui maximise la distance entre la distribution des « scores » de projection, et une distribution de l'arrière-plan. On obtient alors une projection qui met en évidence toutes les anomalies par rapport à l'arrière-plan, en particulier les panaches de gaz.

Une comparaison des résultats des méthodes PP, PCA et SMF a été effectuée dans [20] sur une scène simulée par le code DIRSIG. L'image synthétique comporte deux panaches de gaz : le premier contient du NH_3 et le deuxième est composé de Fréon-114. Les résultats produits par PP et PCA sont assez similaires. Ces deux méthodes permettent de séparer les cas où le panache est en émission de ceux où il est en absorption. Cependant, elles donnent plus de fausses alarmes que le SMF, puisque elles n'utilisent pas d'informations *a priori* sur la nature des gaz présents dans la scène. Les résultats de SMF mettent en évidence la sensibilité de cette méthode aux caractéristiques du bruit de l'image synthétique.

En partant des conclusions de l'étude de *Messinger* [20] et des résultats qualitatifs que nous avons montré ci-dessus, nous déduisons que les méthodes SMF et GLRT sont celles qui donnent les meilleurs résultats pour la détection des panaches. En effet, ces deux algorithmes donnent moins de cas de fausses détection que les autres algorithmes, car ils intègrent des connaissances *a priori* sur la nature des gaz. De plus, ils permettent d'avoir un début de quantification des gaz du panache, comme nous l'avons mentionné auparavant.

En comparant les figures 3.8 et 3.10, on constate que les résultats obtenus par SMF sont légèrement meilleurs que ceux obtenus avec GLRT. En conséquence, pour la suite de nos travaux, nous privilégierons les méthodes de Spectral Matched Filter pour la détection des panaches. Nous utiliserons les absorbances de la base PNNL comme vecteurs de la base des gaz cibles, et nous calculerons la matrice des covariances $\Sigma_{\mathbf{x}}$, lorsqu'il est possible, sur des zones de l'image ne contenant pas de panache.

3.3 Outils et traitements préliminaires à la quantification de panache par imagerie hyperspectrale

3.3.1 Introduction

Avant de nous attaquer à l'état de l'art de la quantification des panaches de gaz, nous allons présenter dans cette section deux pré-traitements des images hyperspectrales. Il s'agit de la correction atmosphérique de la scène et du découplage de la température et de l'émissivité du sol. La plupart des méthodes de quantification de gaz sont précédées par ces deux pré-traitements. L'objectif étant

de se soustraire des composantes du signal ne contenant pas d'information sur le panache (correction atmosphérique) et de déterminer les inconnues de l'équation du rayonnement n'impliquant pas le panache (caractérisation de la température et de l'émissivité du sol).

Notons qu'il existe également des approches permettant d'effectuer ces deux tâches conjointement. Ils réalisent ainsi à la fois la correction atmosphérique et l'estimation de la température et de l'émissivité du sol.

3.3.2 Caractérisation du fond atmosphérique : correction atmosphérique

L'objectif de la correction atmosphérique est de déterminer les termes atmosphériques du rayonnement arrivant au niveau du capteur, afin de s'affranchir de leurs contributions au signal global. Les termes de l'équation du rayonnement (cf. eq.1.9 et eq.1.9) concernés par la correction atmosphérique sont :

- La luminance atmosphérique montante L_{atm}^ϵ ,
- La transmission atmosphérique montante τ_{atm} .

Plusieurs hypothèses sur l'atmosphère sont nécessaires pour réaliser la correction atmosphérique. Ainsi, la majorité des algorithmes développés considèrent que les propriétés de l'atmosphère sont les mêmes pour tous les pixels de la scène. Les erreurs induites par ces hypothèses se répercutent directement sur la qualité de la correction atmosphérique, et *a fortiori* sur les performances du processus de quantification des gaz.

La méthode *In-Scene Atmospheric Compensation* (ISAC) [66] suppose que toute scène contient, pour chaque longueur d'onde, des pixels avec une émissivité égale à 1, et qu'il y a une variabilité de la température du sol au sein de ces pixels. Pour la bande spectrale LWIR, cette hypothèse est acceptable pour les pixels contenant de l'eau, de la végétation dense ou des surfaces très rugueuses au sein desquelles plusieurs réflexions ont lieu (cf. paragraphe sur la réflexion dans § 1.3.2). Pour ces pixels l'équation 1.9 (cas sans panache) devient :

$$L_{capteur}(\lambda, T_{sfc}) = L_{atm}^\epsilon(\lambda) + B(\lambda, T_{sfc}) \cdot \tau_{atm}(\lambda) \quad (3.12)$$

Une fois ces pixels identifiés, la variabilité de la température du sol permet de retrouver les termes atmosphériques $L_{atm}^\epsilon(\lambda)$ et $\tau_{atm}(\lambda)$ à l'aide d'une régression linéaire de la luminance $L_{capteur}(\lambda, T_{sfc})$ en fonction de l'émission du sol $B(\lambda, T_{sfc})$. Un calcul préalable de la température du sol T_{sfc} est nécessaire. Il est effectué en inversant la loi du corps noir à une longueur d'onde λ_r , pour laquelle la transmittance est proche de l'unité et la luminance atmosphérique montante est proche de zéro.

Gu et al. ont développé l'algorithme *Autonomous Atmospheric Compensation* (AAC) [67]. Cet algorithme suppose que la variabilité spatiale de la transmittance est due principalement à la vapeur d'eau et aux autres gaz atmosphériques, modélisés par des profils atmosphériques standards. Ainsi, deux longueurs d'onde λ_S et λ_W , correspondant respectivement à des longueurs d'onde avec une grande et une faible absorption atmosphérique, sont utilisées afin d'écrire :

$$L_{\text{capteur}}(\lambda_S, T_{\text{sfc}}) = \underbrace{\frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_S)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_W)}}_{Tr} L_{\text{capteur}}(\lambda_W, T_{\text{sfc}}) + \underbrace{L_{\text{atm}}^\epsilon(\lambda_S) - \frac{\tau_{\text{atm}}(\lambda_S)}{\tau_{\text{atm}}(\lambda_W)} L_{\text{atm}}^\epsilon(\lambda_W)}_{Pd} \quad (3.13)$$

Les deux longueurs d'onde λ_S et λ_W sont prises autour de $11.7 \mu m$ correspondant à la limite de la bande d'absorption de la vapeur d'eau.

Ensuite, comme pour ISAC la relation 3.13 est écrite pour plusieurs pixels, ce qui permet de réaliser une régression linéaire pour obtenir Tr et Pd . Ces deux grandeurs sont directement liées aux profils de température et de vapeur d'eau. Ils permettent de retrouver la luminance atmosphérique montante et la transmittance atmosphérique grâce à la formule ci-dessous :

$$y(\lambda) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C_{i,j}(\lambda) Tr^{i-1} Pd^{j-1} \quad (3.14)$$

Avec : y représentant ou $L_{\text{atm}}^\epsilon(\lambda)$ ou $\tau_{\text{atm}}(\lambda)$, et $C_{i,j}(\lambda)$ sont des coefficients dépendant de la longueur d'onde estimés à partir d'une base de données construite par des simulations MODTRAN.

Ces deux méthodes se basent sur une variabilité spatiale de la température du sol, afin que la régression linéaire ait un sens. Ce qui n'est pas toujours le cas. Par ailleurs, l'hypothèse de corps noirs utilisée par la méthode ISAC n'est pas très pertinente dans notre cas. En effet, les matériaux présents dans les scènes industrielles ne sont pas modélisables par des corps noirs.

Les deux méthodes que nous venons de décrire, s'inscrivent dans une approche ne nécessitant pas de connaissances *a priori* pour réaliser la correction atmosphérique. Il existe une autre approche de correction atmosphérique basée sur une connaissance préalable des profils de pression, de température, de vapeur d'eau et des autres constituants de l'atmosphère. Dans ce cas, il suffit de réaliser des simulations MODTRAN permettant de déterminer les deux termes atmosphériques qui nous intéressent : $\tau_{\text{atm}}(\lambda)$ et $L_{\text{atm}}^\epsilon(\lambda)$.

La performance de cette approche est conditionnée par la possibilité d'obtenir des profils atmosphériques bien représentatifs de la scène. Plusieurs méthodes peuvent nous permettre d'estimer ces profils (cf. § 2.2.2). Dans ce document deux types de données sont utilisées : des données synthétiques (cf. Chapitre 2) et des acquisitions réelles effectuées par Telops dans la ville de Québec. Pour le premier type de données, nous disposons des vrais profils atmosphériques qui nous ont servi à

construire l'image hyperspectrale. Ces derniers sont alors utilisés tels quels comme connaissances *a priori*.

Concernant les images acquises par Telops, nous avons eu recours à des radiosondages disponibles sur le site du *Department of Atmospheric Science* de l'Université du Wyoming¹. Les données disponibles sur cette ressource ne concernent malheureusement que des villes américaines. Pour pallier cet inconvénient, nous avons utilisé les radiosondages acquis à Caribou (Maine). Puis par interpolation nous les avons adaptés aux conditions météorologiques de la ville de Québec (température au sol, vitesse du vent, ...), en nous basant sur les données locales disponibles sur le *Centre Météo UQAM*².

3.3.3 Caractérisation des propriétés de surfaces

L'intérêt de cette étape est d'estimer, pour chaque pixel de l'image, la température et l'émissivité du sol. Cette estimation est réalisée à partir du signal de luminance obtenu après correction atmosphérique ($L_C(\lambda, T_{sf_c})$). Nous parlons de découplage de la température et de l'émissivité du sol, car ces deux informations sont contenues dans $L_C(\lambda, T_{sf_c})$.

La difficulté principale de ce processus réside dans le fait qu'il s'agit d'un problème mal-posé : nous cherchons en effet à déterminer $N + 1$ inconnues (N bandes spectrales pour l'émissivité + la température) à partir de N bandes spectrales de la luminance.

Une première approche permettant de résoudre ce problème consiste à réaliser plusieurs mesures de la même zone, avec le même instrument et à différentes températures. Cette famille de méthodes, appelée approche multi-températures, a été explorée dans la littérature depuis plus de vingt ans [68], [69] et [70]. En utilisant deux acquisitions on augmente le nombre d'équations à $2 \times N$ alors qu'on ne rajoute qu'une seule inconnue (la température du sol dans la deuxième acquisition). Le problème de découplage température/émissivité n'est plus sous-déterminé.

Néanmoins, cette approche nécessite au moins deux acquisitions de la même scène, ce qui n'est pas toujours possible. De plus, si les conditions d'acquisition varient peu, le problème demeurera mal-conditionné. Des travaux au sein du département DOTA de l'ONERA ont montré qu'en pratique l'approche multi-température est peu performante.

Si par contre il n'y a qu'une image hyperspectrale disponible, on reste dans le cas d'un problème mal-posé. Afin de contourner cette situation, plusieurs méthodes ont été développées en imposant des critères liés aux propriétés physiques de régularité de l'émissivité. La plus connue de ces méthodes est *Iterative Spectral Smoothness of Temperature and Emissivity Separation* (ISSTES), développée par Borel [71]. Cette méthode s'appuie sur le fait qu'en travaillant avec des résolutions hyperspectrales,

1. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

2. http://meteocentre.com/surface/obs_qc.html

l'éclairement descendant au sol présente une signature de raies d'émission très fine devant les variétés spectrales de l'émissivité d'un fond de sol. Dès lors, une erreur sur l'estimation de la température se traduit par l'apparition de ces raies sur l'émissivité correspondante, comme nous pouvons le constater sur la figure 3.11 issue de la thèse de K. Kanani [57].

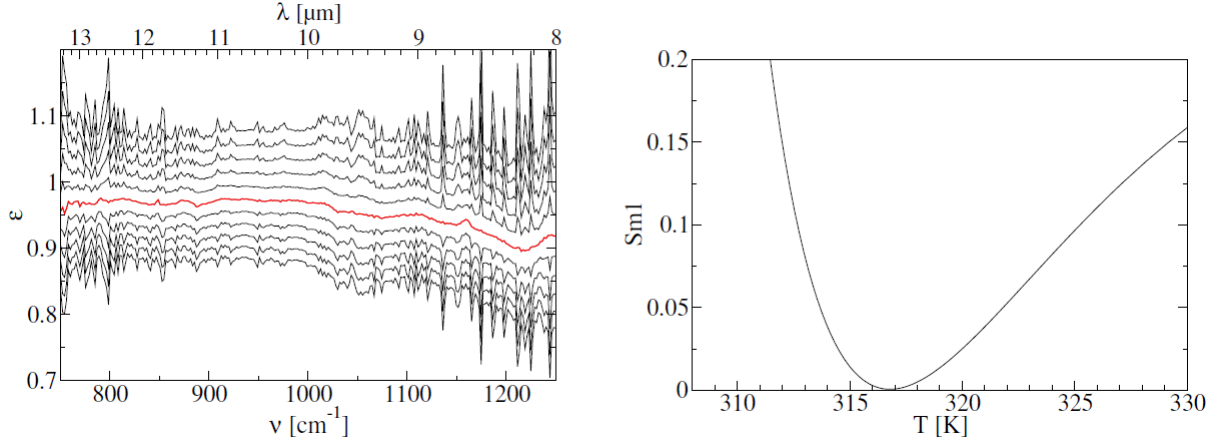


FIGURE 3.11 – Illustration d'un exemple d'émissivités retrouvées en fonction de la température (pas de 1 K entre les courbes) et critère $Sm1$ (critère sur la dérivée première de l'émissivité) associé. La courbe rouge correspond à la température pour laquelle le minimum de $Sm1$ est obtenu. (source : thèse Kanani [57])

La méthode ISSTES introduit un critère permettant de retrouver la température du sol T_{sf_c} , correspondant à l'émissivité la plus « lisse » spectralement au sens de ce critère. On parle de « *Spectrally Smooth Emissivity* ». La démarche suivie par cette méthode commence par une estimation de la température de corps noir T_{est} , calculée pour une fenêtre atmosphérique en supposant que l'émissivité est égale à 0.95. Ensuite, on fait varier la température du sol autour de la valeur de la température T_{est} et on calcule l'émissivité correspondante ($\epsilon(\lambda)$). D'une manière itérative, on cherche la température pour laquelle on minimise le critère de lissage de l'émissivité.

Le critère utilisé par Borel pour caractériser le lissage de la forme spectrale de l'émissivité (ϵ) est donné par :

$$\sigma(\epsilon) = STDEV \left(\epsilon_i - \frac{\epsilon_{i-1} + \epsilon_i + \epsilon_{i+1}}{3} \right)_{i=2, \dots, N-1} \quad (3.15)$$

Dans la formule ci-dessus la notation ϵ_i correspond à l'émissivité pour la i^{me} bande spectrale. N est le nombre de canaux utilisés.

Ainsi, avec ce critère l'émissivité la plus lisse spectralement sera celle qui minimise l'écart-type $\sigma(\epsilon)$.

Dans ses travaux de thèse, K. Kanani [57] a appliqué cette méthode de *Spectral Smoothness* (SpSm) pour retrouver l'émissivité et la température d'un sol donné dans tout le spectre infra-rouge (MWIR et LWIR). Il a montré que cette méthode est très bien adaptée pour les intervalles

$[4.3 - 5 \mu m]$ et $[7.5 - 12.5 \mu m]$. Cependant, la température obtenue ne permet pas de restituer l'émissivité dans le domaine $[3 - 4.3 \mu m]$. En effet, dans ce domaine l'éclairement solaire (E_{soleil}^{\downarrow}) n'est plus négligeable. En outre, K. Kanani a observé une discontinuité et une divergence des émissivités retrouvées par SpSm, pour les longueurs d'onde comprises entre $4 \mu m$ et $4.16 \mu m$. Il explique ces discontinuités et divergences par la non validité de l'hypothèse du sol lambertien pour les sols utilisés.

Afin de résoudre les problèmes de directionnalité et de l'éclairement solaire, il introduit une nouvelle méthode appelée *Smoothness and Continuity* (SmaC). Le principe de cette dernière est le même que celui de SpSm, à la différence qu'une composante de l'éclairement solaire vient s'ajouter à l'éclairement descendant au sol. Pour tenir compte de l'effet de la directionnalité, E_{soleil}^{\downarrow} est multiplié par un facteur de forme f .

SmaC commence par déterminer la température du sol, en effectuant un SpSm sur la bande $[4.3 - 5 \mu m]$. Ensuite, une optimisation d'un critère de continuité permet de trouver itérativement le facteur de forme pour lequel l'émissivité ne présente pas de discontinuité.

3.3.4 Conclusion

Dans cette section nous nous sommes intéressés à la caractérisation des termes atmosphériques (luminance montante et transmission) ainsi que des propriétés de surface (émissivité et température). Dans la littérature, ces deux processus sont mieux connus sous le nom de correction atmosphérique et de découplage émissivité/température. La caractérisation de ces termes va nous permettre de déterminer toutes les inconnues de l'équation du rayonnement, ne correspondant pas au panache. Par conséquent dans la section suivante, seuls les paramètres du panache seront considérés comme des inconnues.

Comme nous l'avons fait remarquer, les termes atmosphériques sont considérés comme étant les mêmes dans toute la scène. Ils seront donc déterminés uniquement en utilisant les pixels hors panache, afin de réduire les sources potentielles d'erreurs. Par ailleurs, la caractérisation des propriétés de surfaces des pixels contenant du panache sera effectuée à la suite d'une estimation de la luminance sans panache (L_{off}) de ces pixels. Nous détaillerons dans un chapitre ultérieur, la démarche suivie pour l'estimation de cette luminance sans panache.

3.4 Méthodes de quantification de panache par imagerie hyperspectrale

3.4.1 Introduction

Après avoir présenté quelques outils de détection de panache et de caractérisation des termes atmosphériques et des propriétés de surfaces, nous allons nous intéresser dans cette section à la quantification des gaz émis à partir des acquisitions hyperspectrales. Il s'agit dans cette phase de retrouver les concentrations des différents composants du panache. Pour ensuite exploiter ces informations afin de calculer les débits massiques d'émission. Cette démarche s'inscrit dans le suivi environnemental des émissions industrielles. Elle peut servir aussi à la gestion de catastrophes industrielles, comme nous l'avons évoqué dans le premier chapitre.

Pour retrouver la concentration des gaz présents dans un panache, la majorité des techniques retrouvées dans la littérature établissent un modèle inverse de la luminance en entrée du capteur aéroporté. Ces algorithmes peuvent être classés selon les approximations introduites sur la transmittance du panache en approche linéaire et approche non-linéaire. Les algorithmes avec une approche linéaire de la loi de Beer-Lambert sont adaptés uniquement pour les panaches optiquement minces, alors que l'approche non-linéaire permet de traiter le cas de panaches épais. Chacune de ces deux approches peut être subdivisée en différentes sous-classes, selon la manière de traiter la luminance de l'arrière-plan comme le font remarquer *Manolakis et al.* [59].

3.4.2 Approche linéaire

L'approche linéaire est basée sur la simplification du calcul de la transmittance, en linéarisant la loi de Beer-Lambert (cf. eq.1.5). Cette simplification est valable à condition que le panache soit optiquement mince. Plusieurs algorithmes ont été proposés par *Gallagher et al.* [72] pour le cas d'un panache en équilibre thermique avec l'atmosphère : *Extended Least-Squares* (ELS), *Generalized Least-Squares* (GLS), et leurs variantes respectives. Par ailleurs, les techniques introduites par Young [73] et *Hayden et al.* [74] sont adaptées pour le cas d'un panache hors équilibre thermique avec l'atmosphère. Nous allons présenter brièvement ces différentes méthodes. Seule la technique de Young sera détaillée, car elle a été reprise dans nos travaux comme nous allons le voir dans la suite de ce document.

Extended Least-Squares (ELS) [72]

Pour un même pixel, *Gallagher et al.* écrivent les luminances obtenues en entrée de capteur en présence d'un panache (L_{on}) et en son absence (L_{off}). À partir de ces équations, ils expriment la transmittance du panache comme ci-dessous :

$$\tau_p = \frac{L_{on} - L_{atm}^{\uparrow} - \tau_{atm}^{\uparrow} \cdot B(T_p)}{L_{off} - L_{atm}^{\uparrow} - \tau_{atm}^{\uparrow} \cdot B(T_p)} \quad (3.16)$$

En linéarisant la transmittance du panache, et en utilisant les valeurs moyennes de la transmittance atmosphérique (τ_{atm}^\uparrow), la luminance atmosphérique montante (L_{atm}^\uparrow) et la luminance sans panache (L_{off}), *Gallagher et al.* réécrivent l'équation 3.16 sous forme vectorielle :

$$\mathbf{q} \cdot \underbrace{\alpha^T \odot (\mathbf{1}_{Nb\text{gaz} \times 1} \cdot \mathbf{d}^T)}_{\tilde{\mathbf{S}}^T} = \mathbf{L}_{on} - \mathbf{L}_{off} \quad (3.17)$$

Avec \odot le produit de Hadamard (multiplication élément-par-élément), \mathbf{q} est une matrice $1 \times Nb\text{gaz}$ représentant les concentrations intégrées des différents gaz présents dans le panache. α^T est la matrice $Nb\text{Band} \times Nb\text{gaz}$ des absorbances des différents gaz du panache, \mathbf{d} est un vecteur $Nb\text{Band} \times 1$ égal à : $\tau_{atm}^\uparrow \cdot B(T_p) + L_{atm}^\uparrow - L_{off}$.

Le vecteur \mathbf{L}_{off} n'est pas connu pour les pixels contenant du panache. Néanmoins, il est supposé appartenir au sous-espace formé par les luminances des pixels sans panache. Une base de ce sous-espace est déterminée par une analyse en composantes principales, sur l'ensemble des pixels hors panache. La luminance \mathbf{L}_{off} peut alors s'exprimer dans cette base :

$$\mathbf{L}_{off} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{P}_{off}^T + \mathbf{E} \quad (3.18)$$

\mathbf{P}_{off} est la base du sous-espace des luminances des pixels sans panache obtenue par PCA. \mathbf{u} représente les coefficients de projection de la luminance \mathbf{L}_{off} sur la base, \mathbf{E} est le résidu de projection.

En substituant l'expression 3.18 dans l'équation 3.17, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \mathbf{q} \cdot \tilde{\mathbf{S}}^T &= \mathbf{L}_{on} - \mathbf{u} \cdot \mathbf{P}_{off}^T \\ [\mathbf{q} \ \mathbf{u}] \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{S}} & \mathbf{P}_{off} \end{bmatrix}^T &= \mathbf{L}_{on} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Une estimation par moindres carrés permet de retrouver \mathbf{q} et \mathbf{u} . Pour cela on utilise la pseudo-inverse de Moore-Penrose, donnée par : $Z^\dagger = (Z^T Z)^T$.

$$[\hat{\mathbf{q}} \ \hat{\mathbf{u}}] = \mathbf{L}_{on} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{S}} & \mathbf{P}_{off} \end{bmatrix}^{\dagger T} \quad (3.20)$$

Il existe une variante de la méthode ELS, appelée Iterative ELS (ELSI), qui permet d'obtenir de meilleures estimations de la concentration. Le principe est de réintroduire itérativement l'estimation de la luminance \mathbf{L}_{off} dans le calcul de \mathbf{d} (cf. eq.3.17) avant d'appliquer à nouveau la régression ELS pour trouver une nouvelle valeur pour la concentration.

Generalized Least-Squares (GLS) [72]

Gallagher et al. introduisent une autre technique linéaire, pour estimer la concentration des composants du panache. Cette dernière, appelée *Generalized Least-Squares* (GLS), prend en compte

le signal sans panache par pondération. Ainsi l'équation 3.17 est réécrite, en utilisant la luminance moyenne des pixels sans panache $\overline{\mathbf{L}_{\text{off}}}$:

$$\mathbf{L}_{\text{on}} - \overline{\mathbf{L}_{\text{off}}} = \mathbf{q} \cdot \tilde{\mathbf{S}}^{\text{T}} + (\mathbf{L}_{\text{off}} - \overline{\mathbf{L}_{\text{off}}}) \quad (3.21)$$

La concentration au sein du panache est alors estimée par :

$$\hat{\mathbf{q}} = (\mathbf{L}_{\text{on}} - \overline{\mathbf{L}_{\text{off}}}) \Sigma_{L_{\text{off}}}^{-1} \tilde{\mathbf{S}} \left(\tilde{\mathbf{S}}^{\text{T}} \Sigma_{L_{\text{off}}}^{-1} \tilde{\mathbf{S}} \right)^{-1} \quad (3.22)$$

Où : $\Sigma_{L_{\text{off}}}$ est la matrice de covariance des luminances des pixels ne contenant pas de panache.

Notons que l'expression ci-dessus est à rapprocher à l'expression 3.6 utilisée par l'algorithme SMF pour la détection du panache de gaz.

Deux variantes de la méthodes GLS ont été développées. La première appelée Iterative GLS (GLSI) consiste à reprendre le même schéma que la méthode ELSI, à la seule différence que la dernière estimation de la concentration se fait à l'aide de l'estimateur GLS (cf. eq.3.22).

D'autre part, si l'estimation de la luminance d'arrière-plan donnée par ELS est suffisamment précise, le modèle GLS (eq.3.21) est alors réécrit :

$$\mathbf{L}_{\text{on}} - \mathbf{u} \cdot \mathbf{P}_{\text{off}}^{\text{T}} = \mathbf{q} \cdot \tilde{\mathbf{S}}^{\text{T}} + (\mathbf{L}_{\text{off}} - \mathbf{u} \cdot \mathbf{P}_{\text{off}}^{\text{T}}) \quad (3.23)$$

Ensuite l'estimateur GLSI (avec réestimation à chaque étape de \tilde{S}) peut se réécrire :

$$\hat{\mathbf{q}} = (\mathbf{L}_{\text{on}} - \mathbf{u} \cdot \mathbf{P}_{\text{off}}^{\text{T}}) \Sigma^{-1} \tilde{\mathbf{S}} \left(\tilde{\mathbf{S}}^{\text{T}} \Sigma^{-1} \tilde{\mathbf{S}} \right)^{-1} \quad (3.24)$$

Pour cette deuxième variante de la méthode GLS, appelée estimation GLS finale (GLSF), la matrice des covariances $\Sigma_{L_{\text{off}}}$ est remplacée par une matrice diagonale Σ , où les éléments diagonaux sont estimés à partir de la matrice résiduelle de la PCA sur les luminances des pixels ne contenant pas de panache.

Ordinary Least-Squares (OLS) [73]

OLS est la méthode de caractérisation de panache développée par Young. Il s'agit d'une approche basée sur une régression linéaire permettant de retrouver les concentrations intégrées sur une colonne pour un panache de gaz.

Nous présenterons dans un premier temps la modélisation de la luminance différentielle introduite par Young. Ensuite, nous détaillerons la régression linéaire permettant la résolution du problème de quantification du panache.

Modélisation de la luminance différentielle

L'expression des équations de transfert radiatif utilisée par Young est légèrement différente de celle que nous avons précédemment établie. Nous commencerons donc par reprendre le formalisme de Young pour exprimer les luminances en entrée d'un capteur.

La luminance en entrée de capteur pour une atmosphère sans panache peut s'exprimer ainsi :

$$L_{off} = L_{atm}^\epsilon + ((1 - \epsilon_{sfc})L_d + \epsilon_{sfc}B(T_{sfc}))\tau_{atm} \quad (3.25)$$

Avec L_d la luminance atmosphériques descendante au sol depuis toutes les couches de l'atmosphère.

En présence d'une couche de panache d'une hauteur H_p , l'expression de la luminance devient la suivante :

$$L_{on} = L_{atm}^\epsilon + ([L_d\tau_p + \epsilon_p B(T_p)] \cdot (1 - \epsilon_{sfc}) + \epsilon_{sfc}B(T_{sfc})) \cdot \tau_p + \epsilon_p B(T_p) \tau_{atm} \quad (3.26)$$

Une correction atmosphérique est réalisée sur toute l'image, afin d'enlever la contribution des composantes dues uniquement à l'atmosphère, à savoir L_{atm}^ϵ et τ_{atm} . On considère que ces deux composantes sont les mêmes pour tous les pixels de l'image. On les estime à l'aide d'une simulation avec un code de transfert radiatif (cf. §3.3.2).

Les luminances corrigées en absence et en présence de panache s'expriment ainsi :

$$\begin{cases} L_{off,C} &= (1 - \epsilon_{sfc})L_d + \epsilon_{sfc}B(T_{sfc}) \\ L_{on,C} &= [L_d\tau_p + \epsilon_p B(T_p)] \cdot (1 - \epsilon_{sfc}) + \epsilon_{sfc}B(T_{sfc}) \cdot \tau_p + \epsilon_p B(T_p) \end{cases} \quad (3.27)$$

On définit la luminance différentielle : $\Delta L = L_{on,C} - L_{off,C}$; qui peut s'exprimer, pour une modélisation monocouche du panache, ainsi (cf. [75]) :

$$\Delta L = (1 - \tau_p) \cdot [B(T_p) - \epsilon_{sfc}B(T_{sfc}) + (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot (B(T_p)\tau_p - (1 + \tau_p)L_d)] \quad (3.28)$$

En négligeant la luminance descendante réfléchiée par le sol, la luminance différentielle s'écrit :

$$\Delta L = (1 - \tau_p) \cdot [B(T_p) - \epsilon_{sfc}B(T_{sfc})] \quad (3.29)$$

En se basant sur la loi de Beer-Lambert pour une couche optiquement mince de panache (formule 1.5), on peut écrire la luminance différentielle comme suit :

$$\Delta L = \sum_{g=1}^{Nb_{gaz}} \kappa_g \cdot q_g \cdot [B(T_p) - \epsilon_{sfc}B(T_{sfc})] = \sum_{g=1}^{Nb_{gaz}} \kappa_g(\lambda) \cdot C_g(\lambda) \quad (3.30)$$

On définit alors le contraste thermique pour chacun des gaz comme étant : $C_g(\lambda) = q_g \cdot [B(T_p) - \epsilon_{sfc}B(T_{sfc})]$. Au premier ordre le contraste thermique a une variation spectrale similaire à celle de la loi de Planck.

Par conséquent, on considèrera qu'il ne varie que très peu spectralement. On peut alors l'approximer par sa moyenne spectrale :

$$C_g(\lambda) \simeq C_g = q_g \cdot \frac{\int [B(T_p) - \epsilon_{sfc} B(T_{sfc})] \cdot \kappa_g(\lambda) d\lambda}{\int \kappa_g(\lambda) d\lambda} \quad (3.31)$$

Résolution du problème linéaire

Le contraste thermique est directement lié à la concentration intégrée sur une colonne d'un gaz. Il suffit donc de retrouver cette grandeur afin de déterminer les concentrations des différents gaz dans le panache.

D'après les équations 3.28 et 3.29, le contraste thermique peut être retrouvé en résolvant l'équation linéaire vectorielle ci-dessous :

$$\Delta \mathbf{L} = \mathbf{K} \times \mathbf{C} + \mathbf{e} \quad (3.32)$$

Avec $\Delta \mathbf{L}$ la différence entre le spectre mesuré et le spectre estimé pour une atmosphère sans panache, \mathbf{K} est la matrice contenant les coefficients d'absorption des différents gaz, \mathbf{C} le vecteur contenant les contrastes thermiques des différents gaz présents dans le panache et \mathbf{e} le vecteur erreur à minimiser. La solution exacte de ce problème est la suivante :

$$\begin{cases} \mathbf{C} &= (\mathbf{K}^T \Sigma_{\mathbf{L}}^{-1} \mathbf{K})^{-1} (\mathbf{K}^T \Sigma_{\mathbf{L}}^{-1} \Delta \mathbf{L}) \\ \Sigma_{\mathbf{L}} &= \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (L_n - \langle L \rangle)^T (L_n - \langle L \rangle) \end{cases} \quad (3.33)$$

Avec : L_n la luminance du $n^{\text{ème}}$ pixel considéré pour le calcul de la matrice de covariance $\Sigma_{\mathbf{L}}$, N est le nombre des pixels considérés pour ce calcul. $\langle L \rangle$ est la moyenne des luminances L_n .

Notons que cette solution n'est valable que si les propriétés de l'arrière-plan sont homogènes. Ce qui se traduit par une luminance sans panache (L_0) constante sur toute la zone d'intérêt. Le plus souvent cette hypothèse n'est pas vérifiée. Il faut donc classifier préalablement l'arrière-plan, avant d'appliquer l'équation précédente à chacune des classes. C'est le principe du Clutter tuned Matched Filter [62].

Orthogonal Background Suppression (OBS) [74]

En partant de l'équation 3.30 dans le cas d'un panache composé uniquement d'un seul gaz, nous pouvons écrire la luminance en entrée du capteur aéroporté d'un pixel contenant du gaz, comme suit :

$$L_{on} = L_{off} + C \cdot \kappa \cdot \tau_{atm}^{\uparrow} \quad (3.34)$$

L'algorithme développé par *Hayden et al.* [74], fait appel à la technique de suppression orthogonale de l'arrière-plan (OBS). Cette dernière suppose que la luminance sans panache (L_{off}) d'un pixel contenant du panache s'écrit comme une combinaison linéaire des luminances mesurées pour

les pixels hors panache. Une décomposition en valeurs singulières (SVD) est utilisée pour définir une base à partir des luminances des pixels hors panache. Ainsi, les luminances de l'ensemble des pixels sans panache, s'écrit matriciellement :

$$\mathbf{L}_{\text{off}} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T \quad (3.35)$$

\mathbf{L}_{off} est une matrice regroupant les luminances des pixels sans panache. \mathbf{U} est une matrice constituée des vecteurs de la base orthogonale issue de la décomposition SVD. $\mathbf{\Lambda}$ est la matrice diagonale des valeurs singulières. \mathbf{V} est une matrice de rotation.

En utilisant la décomposition de la composante arrière-plan dans l'équation 3.34, et en écrivant $C = q \cdot \Delta b$ (cf. eq.3.31) ; on obtient :

$$L_{on} = q \cdot \Delta b \cdot \kappa \cdot \tau_{atm}^{\uparrow} + \mathbf{U}\mathbf{c} \quad (3.36)$$

Ici \mathbf{c} est le vecteur des coefficients de projection de la luminance de l'arrière-plan du pixel d'intérêt. En définissant l'opérateur de projection $^{\perp}$ pour un vecteur \mathbf{Z} donné :

$$\mathbf{Z}^{\perp} = \mathbf{Z} - \mathbf{U}(\mathbf{U}^T\mathbf{Z}) \quad (3.37)$$

On montre que la concentration du gaz peut s'exprimer ainsi :

$$q \cdot \Delta b = \frac{\left[\left(\kappa \cdot \tau_{atm}^{\uparrow} \right)^{\perp} \right]^T}{\left[\left(\kappa \cdot \tau_{atm}^{\uparrow} \right)^{\perp} \right]^T \left(\kappa \cdot \tau_{atm}^{\uparrow} \right)} L_{on} \quad (3.38)$$

3.4.3 Approche non-linéaire

Les méthodes linéaires de quantification de panache permettent de donner rapidement des estimations des concentrations de gaz au sein d'un panache. Cependant, ces méthodes ne sont adaptées que pour des panaches optiquement minces (concentrations intégrées inférieures à 300 ppm·m). Pour traiter des cas de panaches épais, plusieurs méthodes non-linéaires ont été proposées. *Hayden et al.* ont amélioré dans l'article [76] la technique OBS, en utilisant un développement en série de Taylor de la transmittance du panache. Pour éviter d'utiliser un tel développement de la transmittance du panache, *Harig et al.* [77] et *Tremblay et al.* [78] introduisent une méthode itérative basée sur une régression des moindres carrés non-linéaire.

Pour traiter la non-linéarité de la transmittance du panache, des méthodes bayésiennes ont été introduites dans les articles [79] [80]. Ces méthodes utilisent un modèle non-linéaire complet pour le calcul de la luminance. *Heasler et al.* [79] mettent en place une régression non-linéaire implémentée via l'algorithme de Metropolis-Hastings. Ces auteurs traitent les paramètres du sol et le

contraste thermique entre le panache et l'atmosphère comme des paramètres de nuisance. En outre, ils explorent complètement la distribution *a posteriori* obtenue par la méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC). Ils présentent un exemple avec des données synthétiques, pour justifier l'intérêt de la distribution *a posteriori* dans le traitement du cas multi-gaz.

Dans son article [80], Gittins utilise un algorithme de type Gauss-Newton afin d'estimer les paramètres du modèle de maximum de vraisemblance. Les paramètres en question, sont issus du modèle non-linéaire de la luminance en entrée du capteur. Ils intègrent les paramètres du sol et ceux du panache (concentrations et température).

Nous allons détailler ci-dessous chacune de ces méthodes non-linéaires.

Une autre approche présentée par *Niu et al.* dans [25] exploite la possibilité d'estimer la luminance de l'arrière-plan (luminance sans panache) pour un pixel qui contient du panache, à partir des bandes spectrales où la transmittance des gaz cibles présents est proche de zéro. Les concentrations peuvent alors être déterminées en exploitant la luminance différentielle, pour des cas où l'atmosphère est bien connue. Cette approche est mieux adaptée pour les gaz ayant des pics d'absorption très étroits, car les bandes où les transmittances correspondantes sont proches de zéro sont nombreuses. Ce qui améliore l'estimation de la luminance de l'arrière-plan.

Amélioration de l'Orthogonal Background Suppression (OBS) [76]

Dans leur article [76], *Hayden et al.* présentent une amélioration de la méthode de l'Orthogonal Background Suppression (OBS) [74], que nous avons déjà exposée. L'amélioration apportée consiste à remplacer la transmittance du panache par son développement en série de Taylor. Pour le cas d'un panache composé d'un unique gaz on écrit :

$$\tau_p(\lambda) = \exp(-\kappa(\lambda) \cdot q) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^{i+1} \kappa^i(\lambda) \cdot q^i}{i!} \quad (3.39)$$

L'équation 3.36 est réécrite avec la nouvelle expression de la transmittance du panache. On applique ensuite à cette nouvelle équation, l'opérateur $^\perp$ défini dans l'équation 3.37. Après une simplification *Hayden et al.* montrent l'égalité ci-dessous :

$$\frac{\left[\left(\kappa^i \cdot \tau_{atm}^\uparrow \right)^\perp \right]^T}{\left[\left(\kappa^i \cdot \tau_{atm}^\uparrow \right)^\perp \right]^T \left(\kappa^i \cdot \tau_{atm}^\uparrow \right)} L_{on} \approx f \overline{\Delta b} \frac{(-1)^{i+1} q^i}{i!} \equiv DCP_i \quad (3.40)$$

Ici : f représente la fraction du pixel contenant du panache, et $\overline{\Delta b}$ est le terme de contraste thermique (Δb) moyenné.

Une estimation de la concentration intégrée du gaz est simplement obtenue par :

$$\hat{q} = -2 \cdot \frac{DCP_2}{DCP_1} \quad (3.41)$$

Nonlinear Least-Squares (NLS) [77] [78]

Dans l'article de *Harig et al.* [77], la quantification de panache est réalisée par une minimisation de la différence entre le spectre de la luminance mesurée (L_{mes}) et celui de la luminance calculée par un modèle non-linéaire (L_{mod}). On cherche à minimiser la somme : $\sum_{i=1}^N (L_{mod}(\lambda_i) - L_{mes}(\lambda_i))^2$, avec N le nombre des bandes spectrales.

Cette minimisation est effectuée à l'aide de la méthode de Levenberg-Marquardt. Une estimation des paramètres du panache obtenue par une méthode linéaire, permet d'initialiser la minimisation.

La technique suivie dans les travaux de *Tremblay et al.* [78] est identique à celle de *Harig et al.*. Une régression non-linéaire basée sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt est utilisée pour estimer les paramètres du panache. *Tremblay et al.* ont une meilleure modélisation de la luminance en entrée du capteur que celle de *Harig et al.*. En effet, le modèle développé par *Harig et al.* est adapté au cas d'un panache en équilibre thermique avec l'atmosphère, où leur température commune est connue grâce à des mesures. En revanche, la méthode de *Tremblay et al.* traite le cas d'un panache de cheminée, où l'équilibre thermique n'est pas atteint au voisinage de celle-ci.

Méthodes bayésiennes [79] [80]

Les acquisitions hyperspectrales sont recueillies dans des conditions non contrôlées. En conséquence, le modèle physique reliant la mesure de la luminance aux estimations des différents paramètres du sol, de l'atmosphère et du panache, est jonché de nombreux paramètres de nuisance. Aussi, les méthodes bayésiennes sont bien adaptées pour ce contexte, car elles intègrent systématiquement les incertitudes associées à tous les paramètres de nuisance dans l'estimation des erreurs des paramètres d'intérêt.

Les méthodes bayésiennes ont toutes le même principe : elles cherchent à déterminer le jeu de paramètres θ pour lequel on obtient le maximum *a posteriori*.

Étant donnée une observation $\tilde{\mathbf{x}}$, correspondant à la mesure de luminance pour un pixel avec panache, la probabilité que le vecteur des paramètres vaut θ est exprimée par :

$$p(\theta|\tilde{\mathbf{x}}) = \frac{p(\tilde{\mathbf{x}}|\theta) \cdot p(\theta)}{p(\tilde{\mathbf{x}})} \quad (3.42)$$

La probabilité $p(\tilde{\mathbf{x}}|\theta)$ correspond à la probabilité conditionnelle d'observer $\tilde{\mathbf{x}}$ en ayant le vecteur des paramètres θ . $p(\theta)$ est la probabilité *a priori* des paramètres du problème. $p(\tilde{\mathbf{x}})$ est la probabilité *a priori* de l'observation $\tilde{\mathbf{x}}$. Le maximum de vraisemblance est obtenu avec le jeu de paramètres qui maximise la probabilité $p(\tilde{\mathbf{x}}|\theta)$. Ce qui équivaut à minimiser $-\ln p(\tilde{\mathbf{x}}|\theta)$. Par ailleurs, pour obtenir le maximum *a posteriori* il faut maximiser la probabilité $p(\theta|\tilde{\mathbf{x}})$. Ce qui revient à minimiser

$-\ln p(\tilde{\mathbf{x}}|\theta) - \ln p(\theta)$. Ce jeu de paramètres est noté : $\hat{\theta}$.

La prise en compte du modèle physique de la luminance en entrée du capteur, des paramètres du problème et le choix de la méthode d'optimisation varient d'une méthode à une autre. Dans leur article [79], *Heasler et al.* emploient une régression non-linéaire implémentée à l'aide de l'algorithme de Metropolis-Hastings. Ils considèrent un modèle de luminance où les termes atmosphériques (luminance montante, transmission et éclairage descendant au sol) sont tous supposés connus. Cette simplification vise à se focaliser sur la source dominante de variabilité à savoir les paramètres du sol. Ainsi, la température et l'émissivité du sol sont intégrées aux paramètres à retrouver. Les autres paramètres sont la température du panache et les concentrations intégrées de chaque composant du panache.

Gittins dans son article [80] présente une autre approche bayésienne. Contrairement à l'approche de *Heasler et al.*, le sol n'est plus caractérisé par sa température et son émissivité, mais par une combinaison linéaire de vecteurs issus d'une PCA sur les pixels sans panache. La concentration du panache et sa température complètent le vecteur des paramètres.

Gittins traduit le problème de maximisation de l'*a posteriori* comme une minimisation de la fonction coût suivante :

$$C(\theta) = \left[\tilde{x} - F(\theta) \right]^T D^{-1} \left[\tilde{x} - F(\theta) \right] + [\theta_c - \theta_a]^T S_\theta [\theta_c - \theta_a] \quad (3.43)$$

$F(\cdot)$ est le modèle utilisé pour le calcul de la luminance à partir des paramètres θ . D^{-1} est une matrice permettant de modéliser le bruit sur la luminance. θ_c est le sous-ensemble des paramètres contraints. θ_a est le vecteur des paramètres *a priori*. Enfin, S_θ est une matrice de régularisation, pénalisant les écarts des paramètres par rapport à θ_a .

La première partie de la fonction coût est appelée attaches aux données, elle permet d'avoir un jeu de paramètres fournissant une luminance proche de celle observée. La deuxième partie contraint les paramètres à être proches d'une valeur *a priori* déduite de la physique du problème.

Pour trouver le minimum de cette fonction coût, Gittins emploie un algorithme itératif de type Gauss-Newton. L'initialisation s'effectue à partir du résultat d'une approche linéaire.

Selected Band (SB) [25]

Niu et al. [25] font remarquer que les méthodes linéaires, bien qu'elles soient limitées au cas de panaches optiquement minces, donnent des estimations des concentrations plus rapides que les méthodes non-linéaires. Dans l'article [25] *Niu et al.* présentent une nouvelle technique aussi rapide que les méthodes linéaires, tout en suivant une approche non-linéaire pour le calcul de la transmit-

tance du panache. Cette technique repose sur la possibilité d'estimer la luminance de fond d'un pixel contenant du panache, comme nous allons l'expliquer par la suite.

Pour un pixel contenant un panache de gaz, les auteurs expriment ainsi la luminance en entrée d'un capteur aéroporté :

$$L_{on}(\lambda) = \tau_p(\lambda)L_{off}(\lambda) + [1 - \tau_p(\lambda)] L_p(\lambda) \quad (3.44)$$

Où la luminance due au panache $L_p(\lambda)$ est exprimée ainsi :

$$L_p(\lambda) = \tau_a(\lambda)B(\lambda, T_p) + [1 - \tau_a(\lambda)] B(\lambda, T_a) \quad (3.45)$$

τ_a et T_a sont respectivement la transmission et la température de la couche d'atmosphère au-dessus du panache (a). T_p est la température du panache.

En partant de l'équation 3.44, on écrit la concentration intégrée d'un gaz composant le panache comme suit :

$$q = \frac{1}{\kappa(\lambda)} \ln \left[\frac{L_{off}(\lambda) - L_p(\lambda)}{L_{on}(\lambda) - L_p(\lambda)} \right] \quad (3.46)$$

La particularité de la méthode de *Niu et al.* est l'estimation de la luminance L_{off} correspondant à la luminance de fond (luminance sans panache d'un pixel qui en contient).

Comme pour beaucoup d'approche de quantification linéaire, les auteurs réalisent une PCA sur un ensemble de pixels sans panache. L'expression de la luminance de fond est alors donnée par l'équation 3.18. Dans ce cas une estimation $\hat{\mathbf{u}}$ de \mathbf{u} est obtenue par moindres carrés :

$$\hat{\mathbf{u}} = L_{off} \mathbf{P}^{\dagger T} \quad (3.47)$$

Pour un pixel contenant du panache, la luminance au niveau du capteur (L_{on}) coïncide avec la luminance de fond pour les longueurs d'onde où la transmittance des gaz présents est proche de zéro. Ainsi, *Niu et al.* proposent de sélectionner ces bandes afin d'écrire :

$$\hat{\mathbf{u}} = L_{on}^{SB} (\mathbf{P}^{SB})^{\dagger T} \quad (3.48)$$

Où l'exposant « SB » indique que seules les bandes sélectionnées ci-dessus sont utilisées. La luminance de fond pour ces bandes est égale à la luminance avec panache : $L_{off}^{SB} = L_{on}^{SB}$. Dans l'exemple présenté dans la figure 3.12, les bandes sélectionnées ont été prises de telle manière que $\tau_p > 0.95$. Dans ce cas 44/85 bandes ont été sélectionnées.

L'estimation de $\hat{\mathbf{u}}$ est alors remplacée dans l'équation 3.18 afin de pouvoir estimer la luminance de fond.

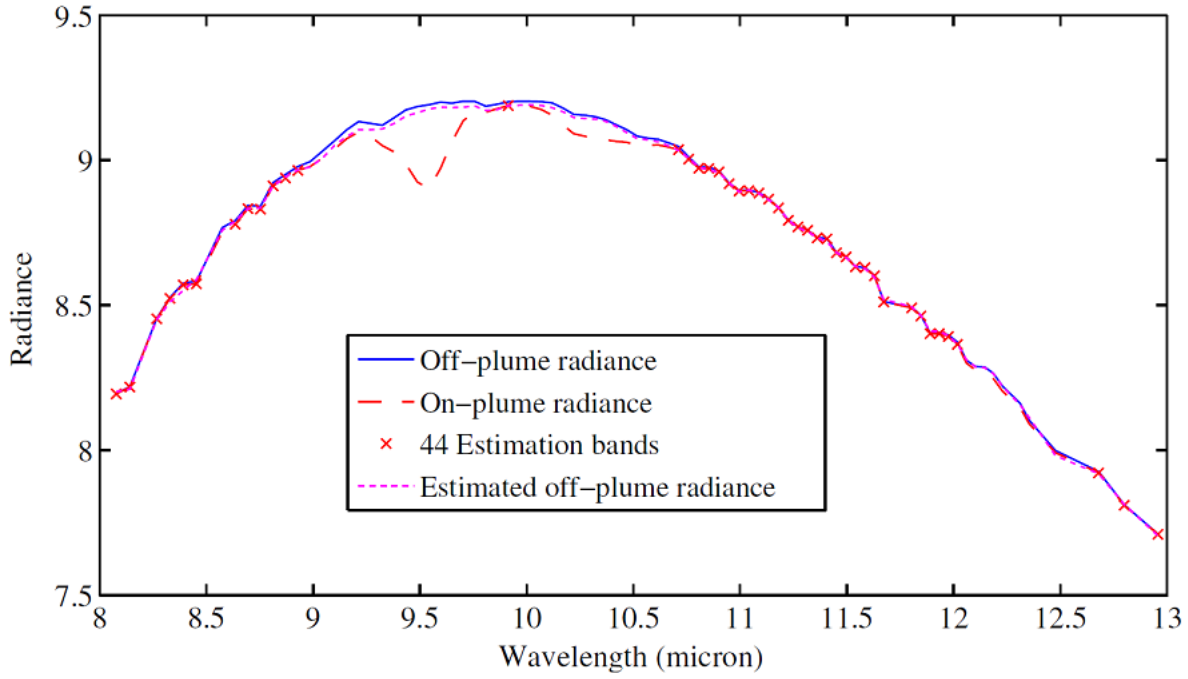


FIGURE 3.12 – Estimation de la luminance de fond pour un pixel contenant du TriEthylPhosphate (TEP), d’une concentration $q = 30 \text{ ppm} \cdot m$. La température du panache est inférieure de 10 K à celle de l’atmosphère. (source [25]).

La figure 3.12 montre une bonne concordance entre la vraie luminance de fond (ligne bleue) et celle estimée par cette méthode (pointillé magenta).

Niu et al. supposent que les paramètres de l’atmosphère (la transmittance τ_a et la température T_a) sont connus et constants pour tous les pixels de l’image. La température du panache T_p est aussi considérée comme étant connue. Ils calculent donc la luminance due au panache L_p à partir de l’équation 3.45.

La concentration intégrée du panache est alors obtenue à partir de l’équation 3.46.

3.4.4 Comparaison et limitations des différentes méthodes

Comparaison des différentes méthodes sur un cas simple

Pour valider leur méthode et montrer sa pertinence, *Niu et al.* ont réalisé une étude comparative sur la quantification de panache. Les algorithmes utilisés dans cette comparaison sont :

- **GLSF** : Generalized Least-Squares Finale,
- **OLS** : Ordinary Least-Squares,
- **OBS** : Orthogonal Background Suppression,
- **NLS** : Nonlinear Least-Squares,
- **SB** : Selected Band.

Pour la régression non-linéaire NLS, *Niu et al.* ont repris l'approche bayésienne introduite par Gitins dans son article [80].

Ces méthodes ont été comparées pour deux scénarii simulés par les auteurs (cf. Chapitre 2). Le premier contient un panache de gaz avec une concentration constante ; alors que pour le deuxième, la concentration suit une distribution gaussienne. Plusieurs images ont été générées, pour différents gaz (SH_6 , TriEthylPhosphate et TriButylPhosphate) et pour différentes concentrations. Les performances de la technique de **Selected Band** dépendent du nombre des bandes spectrales sélectionnées pour l'estimation de la luminance de fond. C'est pourquoi les auteurs ont choisi un gaz avec une signature spectrale localisée (SH_6) et des gaz pour lesquels la signature est étalée (TriEthylPhosphate et TriButylPhosphate) (cf. figure 3.13).

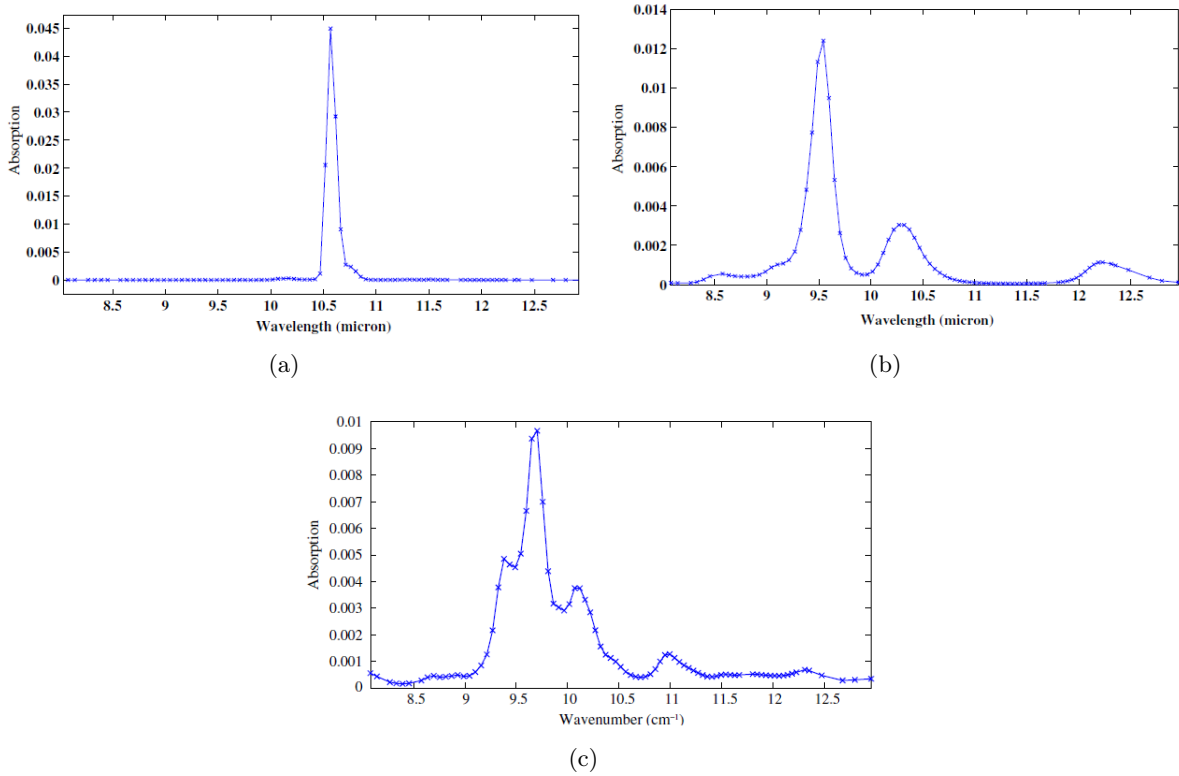


FIGURE 3.13 – Coefficients d'absorption des gaz choisis par *Niu et al.* (a) : absorbance du SF_6 , (b) : absorbance du TriEthylPhosphate (TEP), (c) : absorbance du TriButylPhosphate (TBP). (source [25]).

En effet, avec le premier gaz un grand nombre de bandes pourront être sélectionnées pour l'estimation de la luminance de fond. Tandis que pour les deux autres gaz, l'estimation sera moins performante du fait que moins de bandes spectrales seront mises en jeu.

Pour chacune des méthodes de quantification ci-dessus, *Niu et al.* calculent l'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSEP), définie ainsi :

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{1}{M_{on}} \sum_{i=1}^{M_{on}} (\hat{q}_i - q_i)^2} \quad (3.49)$$

Avec : M_{on} est le nombre de pixels contenant du panache dans l'image traitée. q_i est la concentration effective du gaz pour le i^{me} pixel, alors que \hat{q}_i est la concentration estimée pour ce même pixel. Plus cette erreur est proche de zéro et meilleure est l'estimation.

Sur la figure 3.14, nous avons représenté les résultats de la comparaison de *Niu et al.* entre les cinq algorithmes. La figure 3.14-(a) illustre l'erreur quadratique moyenne de prédiction en fonction de la concentration effective, pour le scénario avec une distribution gaussienne de la concentration.

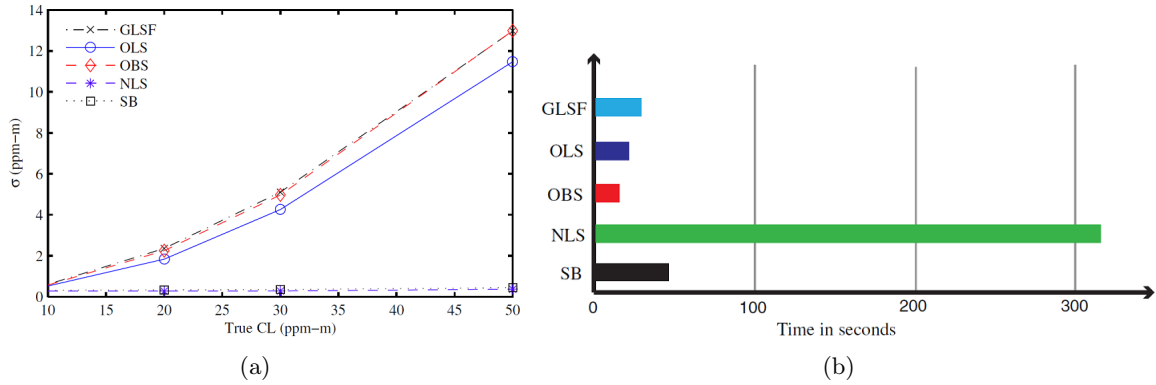


FIGURE 3.14 – Comparaison des performances des différentes méthodes d'estimation de concentration du TEP, avec $T_p = T_a - 10 \text{ K}$. (a) : Illustration de l'erreur quadratique moyenne de prédiction en fonction de la concentration effective (cas d'un profil gaussien). (b) : Comparaison en terme de temps d'exécution des différents algorithmes (source [25]).

Les estimations données par les trois algorithmes linéaires, se dégradent rapidement avec la concentration intégrée du panache. En effet, ces méthodes ne sont pas adaptées pour les panaches optiquement épais. Avec l'algorithme OLS, on obtient de meilleurs résultats qu'avec les deux autres algorithmes. Les auteurs expliquent cette performance de OLS, par un pré-traitement introduit dans l'implémentation de OLS, consistant à éliminer les vecteurs principaux similaires à la signature du gaz.

L'algorithme SB donne des résultats très satisfaisants, car l'erreur quadratique moyenne de prédiction ne dépasse jamais $2 \text{ ppm} \cdot m$ pour toutes les configurations testées. Cette erreur semble être indépendante de l'épaisseur optique du panache. Si le résultat de cet algorithme est utilisé pour initialiser la régression non-linéaire (NLS), l'amélioration obtenue sur l'estimation de la concentration du panache reste négligeable. *Niu et al.* en déduisent que leur approche fournit une solution proche de la solution optimale.

En revanche, il faut noter que la méthode décrite par *Niu et al.* est basée sur une connaissance *a priori* de la température du panache.

En terme de temps de calcul, les trois algorithmes linéaires ont des temps d'exécution très proches. OBS est le plus rapide des trois, alors que OLS nécessite un peu plus de temps, dû à un pré-traitement visant à éliminer les vecteurs principaux similaires à la signature du gaz. GLSF, par sa nature itérative, arrive en troisième position.

On observe une forte augmentation de la durée d'exécution pour les approches non-linéaires, parce que pour ces dernières à chaque itération un processus de simulation du panache est réalisé. L'algorithme SB converge après seulement 3 itérations alors que la méthode NLS nécessite entre 10 et 20 itérations. Ce qui explique la grande différence en terme de temps d'exécution.

Notons que la durée d'exécution du SB reste comparable avec celle des techniques linéaires de quantification de panache.

Limitations des méthodes de quantification

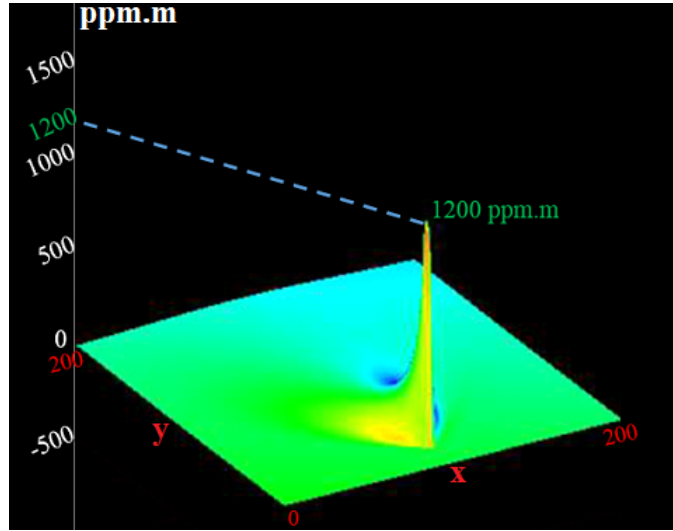
Dans cette partie nous allons nous intéresser à certaines limitations des méthodes de quantification. Nous nous sommes focalisés sur l'approche linéaire introduite par Young dans son article [73] (OLS), pour illustrer ces limitations. Pour cela nous avons appliqué cette méthode de caractérisation sur des images synthétiques, obtenues grâce à notre outil de génération d'images hyperspectrales. Nous allons présenter dans ce qui suit quelques limitations de cette méthode, que nous avons mis en évidence dans [81].

Impact de l'éclairement descendant au sol sur l'inversion

Prise en compte de la réflexion du sol dans l'inversion : La méthode OLS présentée précédemment, ne fait pas intervenir l'éclairement descendant au sol. En effet, cette approche considère le sol comme un corps gris avec une faible réflectance : d'où la possibilité de négliger l'éclairement descendant. Cependant, dans un site industriel, cette hypothèse n'est plus valable étant donné la nature des matériaux présents (acier, cuivre, aluminium, asphalte, ...).

Afin d'estimer l'erreur introduite par cette hypothèse, nous avons simulé un panache industriel de SO_2 (cf. figure 3.15) : la concentration et la différence de température par rapport à une atmosphère sans panache, suivent des distributions gaussiennes, avec une concentration intégrée maximale de $1200 \text{ ppm} \cdot m$ et une différence maximale de température de 100 K .

Ce panache s'étend jusqu'à une altitude de 460 m , au-dessus d'un sol considéré comme un corps gris, avec une émissivité de 0.9 et une température de 282.85 K (cas hivernal). Un bruit blanc gaussien a été ajouté à l'émissivité ($\sigma_{\epsilon_{sf}} = 0.005$) et à la température ($\sigma_{T_{sf}} = 2 \text{ K}$). La zone couvre

FIGURE 3.15 – Distribution gaussienne de la concentration intégrée du panache de SO₂

100 m × 100 m et est échantillonnée avec une résolution spatiale de 1 m.

Les conditions atmosphériques (profils de température / pression / humidité) sont celles d'un hiver aux latitudes moyennes (*Mid-Latitude Winter*).

L'image ainsi définie a été synthétisée à l'aide de notre outil de génération d'images hyperspectrales. Ensuite, nous avons utilisé deux approches d'inversion basées sur le formalisme d'inversion linéaire (cf. [73]). La première, négligeant l'éclairement descendant au sol dans le calcul du contraste thermique, a déjà été présentée dans le paragraphe consacré à la méthode OLS.

La deuxième approche introduit, quant à elle, l'éclairement dans l'expression du contraste thermique. On part de l'expression 3.28 de la différence de luminance (ΔL) entre une atmosphère avec panache et la même atmosphère sans panache, que nous pouvons réécrire ainsi :

$$\begin{aligned}\Delta L &= \epsilon_p \cdot [B(T_p) - \epsilon_{sfc} B(T_{sfc}) - (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot L_d] + \epsilon_p \cdot \tau_p \cdot (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot (B(T_p) - L_d) \quad (3.50) \\ &= \epsilon_p \cdot [B(T_p) - \epsilon_{sfc} B(T_{sfc}) - (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot L_d] + (\epsilon_p - \epsilon_p^2) \cdot (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot (B(T_p) - L_d)\end{aligned}$$

Pour des panaches fins, le terme quadratique en ϵ_p^2 est négligeable devant le terme en ϵ_p . On peut donc écrire :

$$\Delta L = \epsilon_p \cdot [(2 - \epsilon_{sfc}) \cdot B(T_p) - \epsilon_{sfc} B(T_{sfc}) - 2 \cdot (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot L_d] \quad (3.51)$$

On en déduit que le contraste thermique dans ce cas s'exprime :

$$C_g = q_g \cdot \frac{\int [(2 - \epsilon_{sfc}) \cdot B(T_p) - \epsilon_{sfc} B(T_{sfc}) - 2 \cdot (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot L_d] \cdot \kappa_g(\lambda) d\lambda}{\int \kappa_g(\lambda) d\lambda} \quad (3.52)$$

La figure 3.16 illustre une comparaison des résultats obtenus par chacune des deux approches. Lorsque l'éclairement descendant au sol est négligé (figure 3.16-(a)), le signal du panache de SO₂

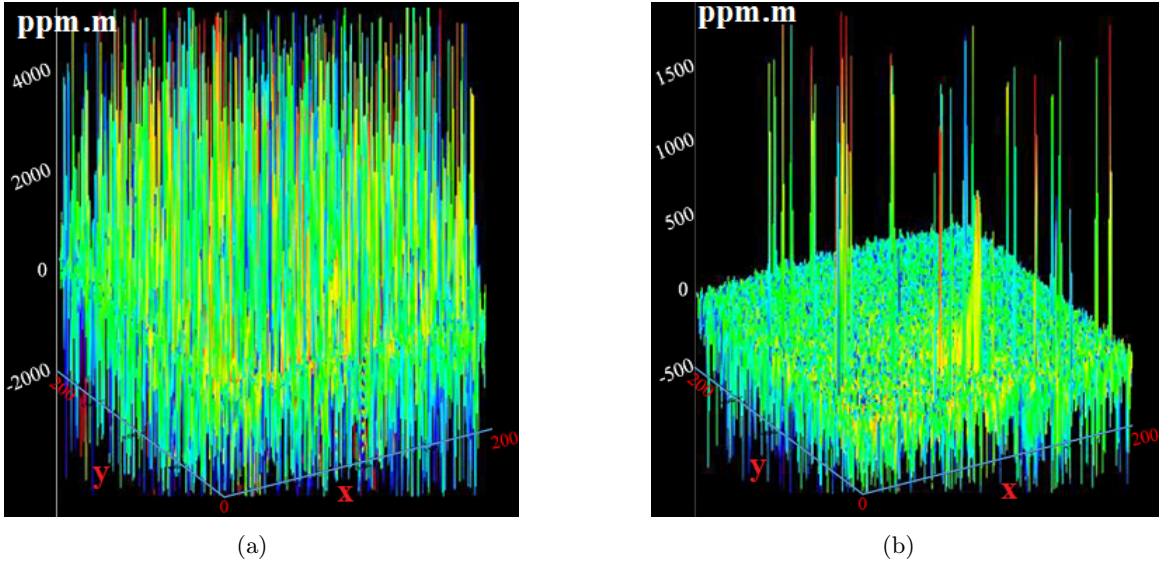


FIGURE 3.16 – Concentration intégrée obtenue par deux approches d’inversion. (a) inversion linéaire négligeant l’éclairement descendant au sol. (b) inversion linéaire en tenant compte de l’éclairement descendant au sol.

est complètement noyé dans le bruit dû à la non prise en compte de la réflexion du sol. Cependant, quand l’éclairement est intégré au modèle d’inversion (figure 3.16-(b)), nous pouvons facilement discerner la forme du panache de SO_2 . Il y a tout de même quelques pixels présentant une instabilité lors de l’inversion. Notons que l’émissivité du sol a été modélisée dans ce cas par une distribution gaussienne, telle que nous l’avons expliqué précédemment.

La figure 3.17 montre que la différence moyenne entre les concentrations obtenues après inversion et la vraie concentration, le long de la ligne centrale du panache, peut dépasser 50 % lorsqu’on ne prend pas en compte l’éclairement. Par contre, la prise en compte de ce dernier dans le calcul du contraste thermique réduit l’erreur à des valeurs en-dessous de 15 %.

Cas du panache fini : Jusqu’à présent nous avons calculé l’éclairement descendant en considérant la couche de panache comme étant infinie horizontalement. Nous allons examiner dans cette partie la pertinence de cette hypothèse, qui est toujours admise dans la littérature. Pour ce faire nous avons calculé l’éclairement descendant pour plusieurs panaches finis. Chaque panache a une extension angulaire de $2 \cdot \theta_p$, avec θ_p variant de 0° (pas de panache) à 90° (panache infini). L’éclairement descendant est alors obtenu en utilisant la formule 2.15, avec des valeurs de la luminance $L(\theta)$ vérifiant :

$$\begin{cases} \text{Contribution du panache : pour } \theta \leq \theta_p, L(\theta) = L_p(\theta) \\ \text{Contribution du ciel clair : pour } \theta > \theta_p, L(\theta) = L_0(\theta) \end{cases}$$

La figure 3.18-(a) montre que moins le panache est étendu et plus l’erreur sur l’éclairement

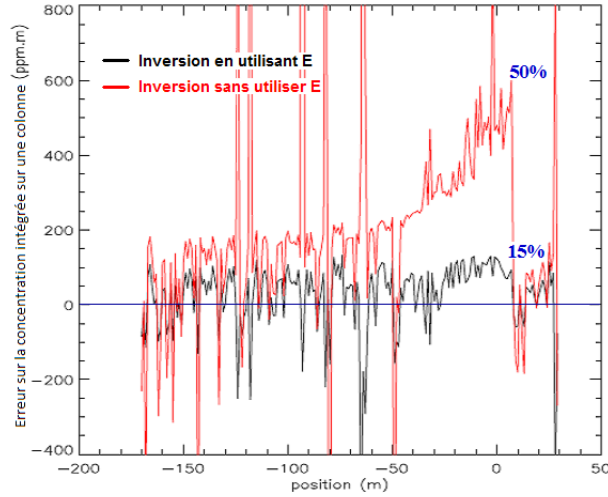


FIGURE 3.17 – Erreur d'inversion en $\text{ppm} \cdot \text{m}$ le long de la ligne centrale du panache, en utilisant l'éclairage dans le modèle d'inversion (courbe noire) et sans l'utiliser (courbe rouge). Pourcentage d'erreur sur l'axe droit

est grande. Avec un panache typique d'une extension horizontale de 150 m et s'étendant jusqu'à une altitude de 150 m ($\theta_p = 45^\circ$), l'erreur introduite par l'hypothèse du panache infini dépasse pour certains nombres d'onde 50 %, comme nous pouvons le remarquer sur la figure 3.18-(b). On

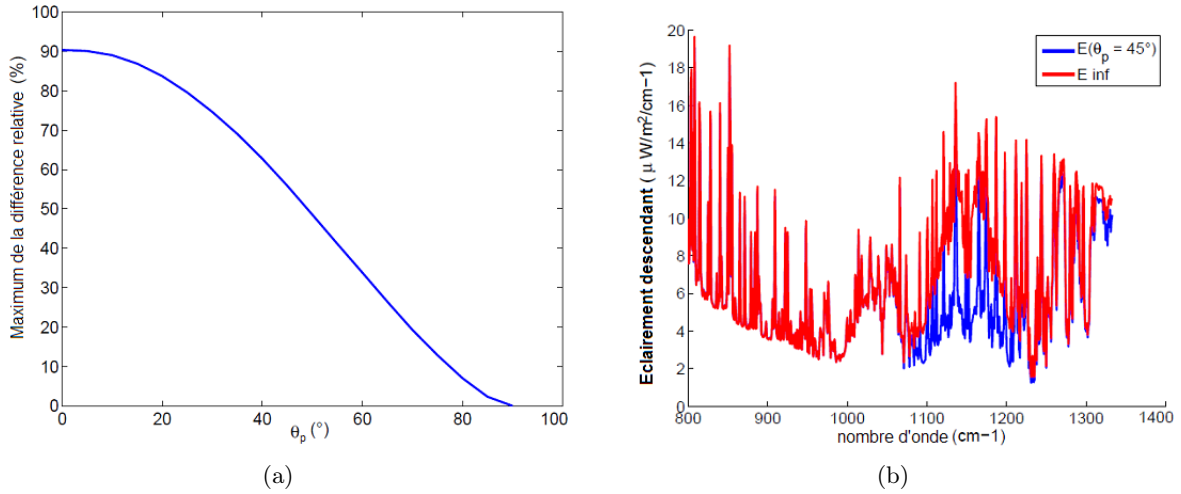


FIGURE 3.18 – Impact de l'hypothèse du panache infini sur l'éclairage. (a) le maximum spectral de la différence relative entre un panache fini et un autre infini, en fonction de l'angle θ_p . (b) Comparaison de l'éclairement descendant d'un panache fini de SO_2 ($\theta_p = 45^\circ$) et d'un panache infini, pour une résolution spectrale de 1 cm^{-1} .

comprend donc l'intérêt de considérer le panache comme une couche finie horizontalement, car l'erreur sur l'éclairement descendant au sol se répercutera sur la concentration estimée.

Impact de l'hétérogénéité spatiale de la scène

Impact de l'hétérogénéité du sol : Malgré l'introduction de l'éclairement dans l'inversion linéaire et la connaissance parfaite des propriétés du sol, nous remarquons des pics de concentration pour différents pixels (cf. Fig 3.16). La figure 3.19, illustre bien l'instabilité de notre inversion le long de la ligne centrale du panache. Il s'agit ici du même panache que celui présenté dans le paragraphe précédent. Cette instabilité est en fait causée par l'hétérogénéité des paramètres du sol (cf. [62], [82]

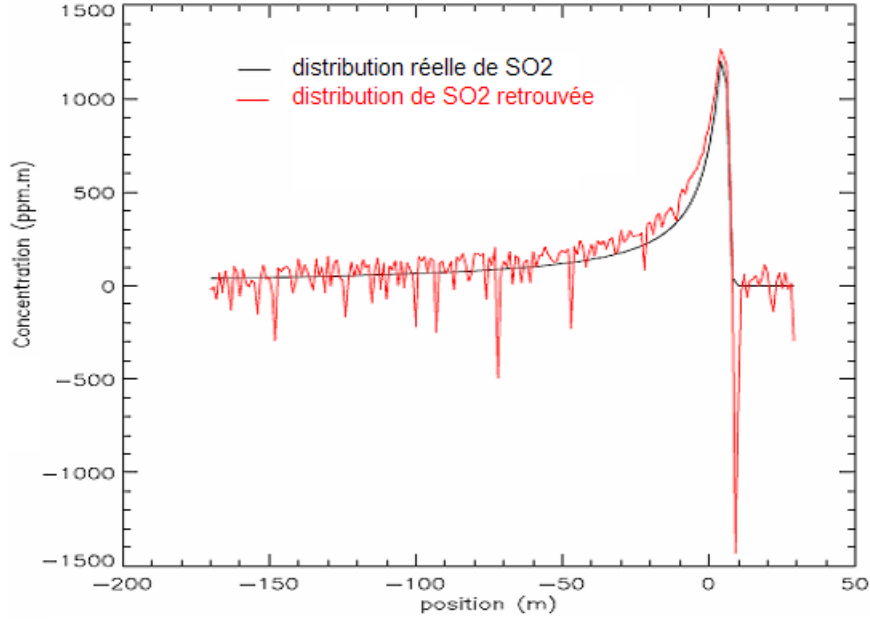


FIGURE 3.19 – Illustration de l'instabilité sur les concentrations estimées le long de la ligne centrale du panache de SO_2 . Cette instabilité est due à l'hétérogénéité des paramètres du sol.

et [24]). En effet, pour un pixel donné, si la température de brillance du sol est proche de celle du panache, alors le contraste thermique sera très faible à cause du terme : $\frac{\int [B(T_p) - \epsilon_{sfc} B(T_{sfc})] \cdot \kappa_g(\lambda) d\lambda}{\int \kappa_g(\lambda) d\lambda}$. Ce qui induira de grandes valeurs pour les concentrations estimées, et dans certains cas ces valeurs sont négatives. Pour remédier à cette instabilité, il est nécessaire d'introduire des contraintes spatiales au modèle de quantification.

Importance de la distribution verticale du panache : La méthode OLS, comme la plupart des méthodes retrouvées dans la littérature, suppose que le panache est une couche homogène en termes de concentration et de température. Cette hypothèse est vérifiée pour des pixels éloignés de la source d'émission de gaz.

Néanmoins, pour des pixels proches de la source d'émission, les profils verticaux de concentration et de température présentent un pic à proximité de l'altitude de la source. Dans ce cas, l'hypothèse de la couche homogène n'est plus réaliste.

La figure 3.20 permet d'apprécier l'erreur induite par la modélisation du panache comme une couche homogène. En effet, nous avons comparé la luminance calculée pour un panache modélisé

par une couche homogène, et celle obtenue pour une modélisation multi-couches. Cette comparaison a été effectuée pour deux pixels différents : le premier (figure 3.20-(a)) est un pixel ayant des profils verticaux de concentration en SO_2 et en température constants ; tandis que pour le deuxième (figure 3.20-(b)), le profil est une distribution gaussienne de la concentration du SO_2 et de la température. Le premier pixel représente un pixel éloigné de la source du panache ; alors que le deuxième est un pixel proche de cette dernière.

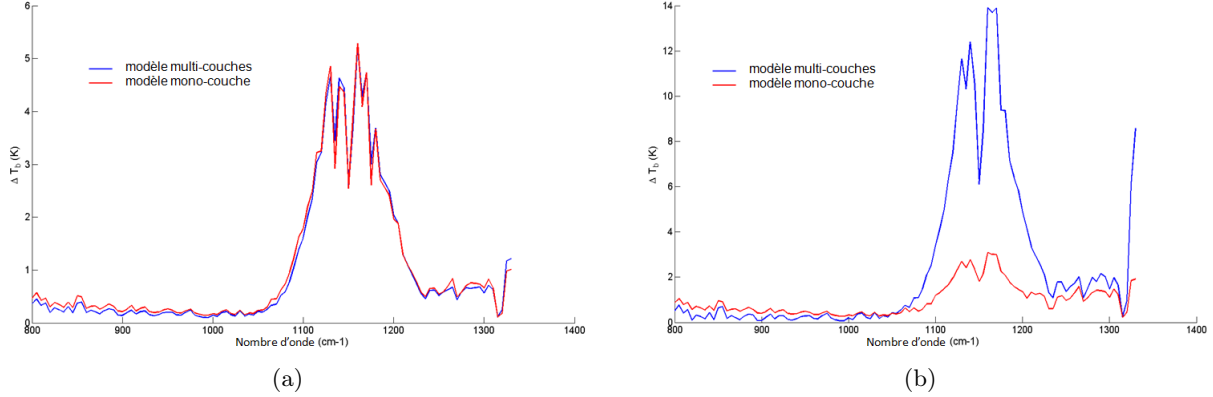


FIGURE 3.20 – Comparaison, en terme de différence de température de brillance, entre une modélisation du panache par une seule couche homogène, et une approche multi-couche. Le cas (a) est un pixel homogène : concentration constante en SO_2 (10 *ppmv* entre 0 et 460 *m*). Le cas (b) est un pixel avec une distribution gaussienne du profil vertical de la concentration du SO_2 , ayant la même valeur intégrée que le cas précédent.

On constate que pour une colonne de panache homogène, les deux modélisations donnent des résultats similaires en terme de luminance. Cependant, dès qu'il s'agit d'une colonne de panache hétérogène, les résultats obtenus par ces deux modèles sont très différents : pour le pixel de la figure 3.20-(b), on a une différence de plus de 10 *K* sur la température de brillance de la signature du panache.

Nous avons tracé sur la figure 3.21 l'évolution de l'écart relatif moyen entre les deux modèles de transfert radiatif (couche homogène et multi-couches), le long de la ligne centrale du panache (cf. figure 3.15). Au voisinage de la source d'émission, l'écart entre les deux résultats est autour de 60 %. En s'éloignant de la source, l'erreur décroît, mais elle reste assez importante : 10 % pour un pixel situé à 100 *m* de la source.

On en déduit de cette comparaison, qu'il est important de tenir compte dans notre quantification du profil vertical de la concentration des gaz.

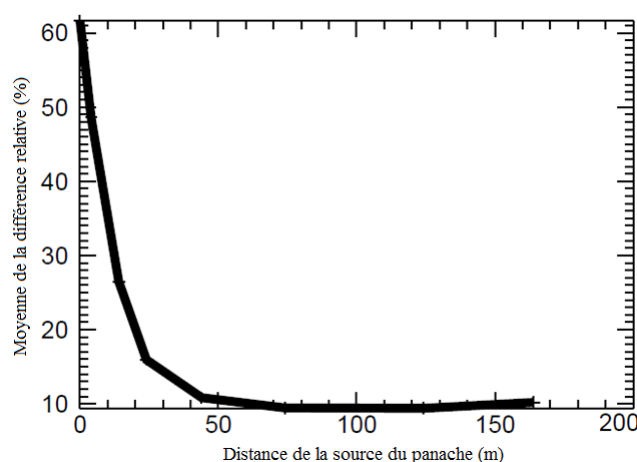


FIGURE 3.21 – Evolution de l'écart relatif moyen entre les deux modèles de transfert radiatif (couche homogène et multi-couches) en fonction de la distance à la source d'émission du gaz.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue, dans un premier temps, les techniques de détection de panache les plus utilisées dans la littérature. Une étude qualitative, sur des images réelles obtenues par l'instrument HyperCam-LW de Telops, nous a permis de sélectionner la méthode SMF pour la suite de nos travaux. En utilisant des informations *a priori* sur la nature des gaz, cette méthode permet d'avoir moins de cas de fausses détections que les autres méthodes.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la caractérisation des paramètres des scènes étudiées n'impliquant pas le panache. Ce qui nous a amené à explorer les techniques de correction atmosphérique, afin de retrouver les termes atmosphériques de la scène. Les techniques de découplage de l'émissivité et de la température du sol ont aussi été examinées, afin de déterminer les paramètres du sol pour chacun des pixels de l'image.

Pour déterminer les paramètres atmosphériques hors panache (luminance et transmission atmosphériques montantes) nous avons opté pour une spécification des profils atmosphériques (pression, température, gaz atmosphérique) à partir des données météorologiques. Puis à partir d'une simulation MODTRAN, on calcule les termes atmosphériques recherchés.

Les paramètres de surface (température et émissivité) sont déterminés ; quant à eux, par l'algorithme SpSm développé par Kanani [57].

La dernière partie de ce chapitre était consacrée aux différents algorithmes de caractérisation des panaches. Les deux familles de méthodes (méthodes linéaires et non-linéaires) ont été explorées à travers les différents algorithmes présentés. Une comparaison sur des cas simples, tirée de l'article [25] de *Niu et al.* montre que les approches linéaires donnent des résultats acceptables lorsque les

concentrations intégrées sont faibles et la température du panache connue. En revanche, les performances de ces méthodes sont très vite détériorées pour des concentrations importantes. Les méthodes non-linéaires donnent des résultats convenables indépendamment des concentrations. Seulement les temps d'exécution pour ces méthodes sont très élevés. La méthode introduite par *Niu et al.* représente un bon compromis entre ces deux familles de méthodes, si la température du panache est connue. En effet, **Selected Band** permet d'avoir des résultats corrects ($RMSEP < 1 \text{ ppm} \cdot m$) même pour des grandes concentrations allant jusqu'à $50 \text{ ppm} \cdot m$, dans un temps d'exécution proche de celui des méthodes linéaires.

Lors de nos travaux, nous avons mis en évidence d'autres limitations des méthodes rencontrées dans la littérature. D'abord, la majorité de ces méthodes ont une approche de quantification pixel-à-pixel. Ce qui ne permet pas d'introduire des contraintes sur la distribution spatiale du panache. En outre, ces méthodes ne traitent pas la distribution verticale des panaches. Elles considèrent que les panaches sont des couches homogènes en température. Ce qui est une source importante d'erreur (entre 10 – 60 % sur la signature du panache en température de brillance) comme nous venons de l'illustrer dans la partie précédente.

Par ailleurs, les méthodes actuelles de quantification de panache n'exploitent que la bande LWIR ($8 - 12 \mu m$), car il est plus simple de modéliser le rayonnement en entrée du capteur pour cette bande. Les gaz pouvant être estimés par ces méthodes sont alors limités à ceux ayant une signature dans la bande LWIR. Il serait donc intéressant de développer des outils adaptés à la bande MWIR ($3 - 5 \mu m$), étant donné le nombre de gaz signant dans cette dernière.

Pour s'affranchir de ces limitations, nous proposons dans le chapitre suivant une nouvelle méthode de caractérisation de panache. Cette dernière exploite une modélisation non-linéaire multi-couches du panache afin de réduire les erreurs d'estimation des paramètres du panache. Elle permet en outre d'introduire des contraintes spatiales sur la distribution du panache. Enfin, notre approche sera adaptée aux bandes spectrales MWIR et LWIR.

Chapitre 4

Estimation des concentrations de gaz dans un panache industriel : Méthode CONLIE

Sommaire

4.1	Introduction	123
4.2	Principe de la méthode	124
4.2.1	Démarche globale	124
4.2.2	Détection du panache	124
4.2.3	Classification	125
4.2.4	Estimation de la luminance de fond (sans panache)	127
4.2.5	Estimation des paramètres de l'atmosphère	128
4.2.6	Estimation des paramètres du sol	128
4.2.7	Estimation des paramètres du panache	129
4.3	Validation et analyse des différentes étapes de la caractérisation du panache.	137
4.3.1	Introduction	137
4.3.2	Étude de la détection du panache	137
4.3.3	Étude de la classification de la scène	142
4.3.4	Performances de l'estimation de la luminance de fond	151
4.3.5	Performances de l'estimation des paramètres de surfaces	162
4.3.6	Étude de l'approche linéaire pour l'initialisation de CONLIE	168
4.4	Conclusion	183

4.1 Introduction

Les méthodes de quantification de panache décrites dans le chapitre précédent présentent certaines limitations. D'abord, ces méthodes ont une estimation pixel-à-pixel des panaches, ce qui ne permet pas d'introduire des contraintes spatiales dans la restitution des concentrations. D'autre part, ces techniques modélisent le panache comme une couche homogène en température. Cette hypothèse introduit une erreur importante dès lors que ces techniques sont appliquées sur des panaches ayant une extension verticale importante. En effet, une erreur sur la température de la couche du panache,

se répercute directement sur les émissions dues à chacun des gaz du panache. Les concentrations seront alors mal estimées. La dernière limitation majeure soulignée est la restriction de ces algorithmes à la bande spectrale LWIR.

Nous nous sommes donnés comme objectif dans nos travaux, de répondre à ces limitations en développant une nouvelle méthode de quantification. Cette méthode doit traiter à la fois la bande spectrale LWIR et la bande MWIR. Elle doit intégrer une modélisation multi-couches du panache et retrouver la distribution verticale des gaz présents. Enfin, elle doit suivre une approche globale capable d'estimer simultanément les concentrations sur tout le panache.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons commencer par présenter les différentes étapes de notre méthode. Ensuite, nous exposerons les résultats obtenus pour chacune de ces étapes, afin de les valider. Nos images hyperspectrales synthétiques ont été utilisées lors de cette validation.

4.2 Principe de la méthode

4.2.1 Démarche globale

Pour retrouver les paramètres d'un panache d'une scène industrielle à partir d'un hypercube de luminance en entrée d'un capteur, plusieurs étapes de pré-traitements sont nécessaires. Ces différentes étapes sont schématisées dans le diagramme de la figure 4.1.

La première étape est la détection du panache. Il s'agit de déterminer la zone sur laquelle s'étend le panache. La deuxième étape consiste à réaliser deux classifications, l'une sur la zone du panache et l'autre sur la zone hors panache. À partir des résultats de ces deux classifications, une estimation de la luminance de fond (L_{off}) est effectuée pour les pixels contenant le panache. Ensuite, les paramètres atmosphériques sont calculés afin de réaliser une correction atmosphérique. Par ailleurs, une détermination des paramètres du sol est effectuée en utilisant une méthode de séparation de température et d'émissivité.

À ce stade, toutes les données nécessaires à l'application de notre outil de caractérisation CONLIE ont été déterminées. Les paramètres du panache (températures et concentrations) sont alors estimés de façon globale sur toute la scène.

4.2.2 Détection du panache

La détection du panache est une étape importante dans notre processus de caractérisation des panaches. D'une part, cette opération nous permet de délimiter la zone de la scène à traiter. D'autre part, notre estimation de la luminance de fond pour les pixels contenant du panache, nécessite l'utilisation des luminances des pixels hors panache, comme nous allons l'expliquer par la suite.

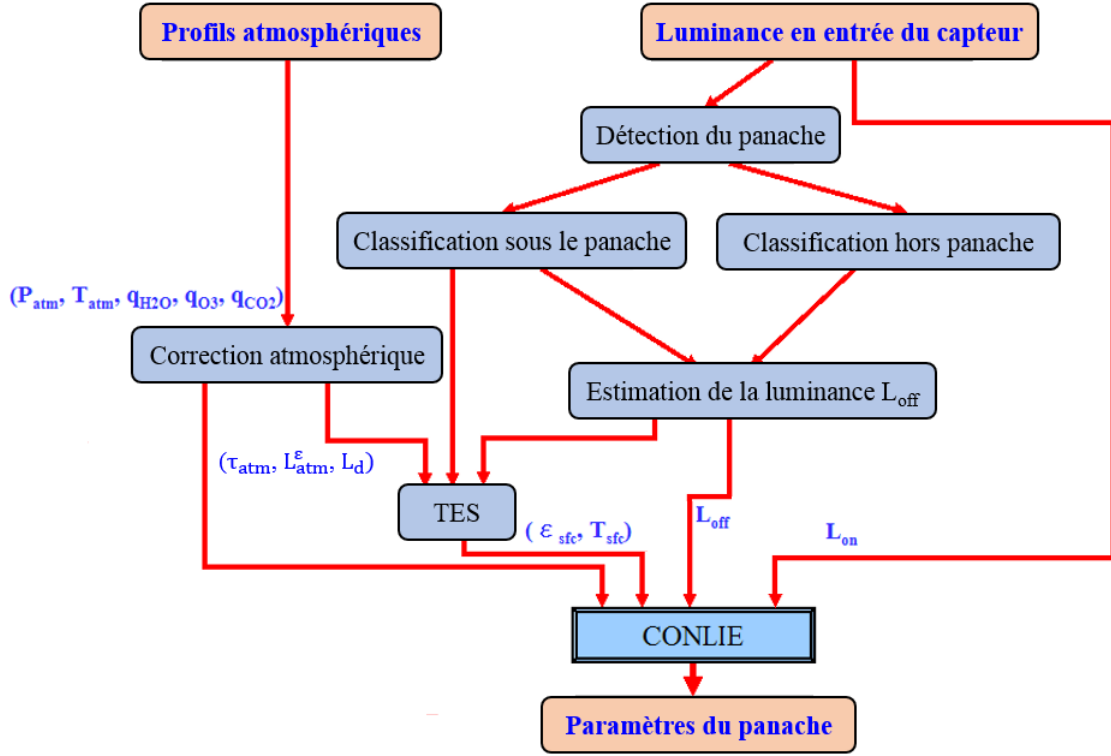


FIGURE 4.1 – Schéma global présentant la méthode développée pour la caractérisation des panaches à partir des images hyperspectrales aéroportées.

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté différentes méthodes de détection de panache. Nous avons choisi d'utiliser la méthode du Spectral Matched Filtering (SMF) pour la détection des panaches dans notre processus de caractérisation de panache.

Nous considérons que les gaz présents dans une scène industrielle sont connus. Ainsi, les absorptions de ces gaz sont utilisées pour construire les vecteurs cibles pour la détection.

4.2.3 Classification

Depuis les travaux de *Funk et al.* [62] la classification des scènes hyperspectrales est une étape préliminaire principale de la caractérisation des panaches. En effet, la classification des scènes vise à éliminer les perturbations dues à l'hétérogénéité du sol d'une scène industrielle, en traitant chaque classe séparément.

Pour chaque scène traitée, deux classifications sont réalisées simultanément : la première implique la région de l'image couverte par le panache ; la deuxième est effectuée sur le reste de l'image. L'intérêt de cette deuxième classification est de pouvoir estimer la luminance de fond des pixels avec panache, comme nous allons le détailler dans la section suivante.

Pour une image hyperspectrale \mathbf{X} donnée, notre classification est organisée en deux phases : la première consiste à réaliser une transformation en composantes principales [20] sur l'image \mathbf{X} . Les premières composantes principales, correspondant aux valeurs principales les plus grandes, sont sélectionnées pour la classification. Ces composantes contiennent la plus grande part de l'information de l'image de départ. Enfin, l'algorithme des *k-means* est appliqué sur ces composantes afin de classifier la scène.

La transformation en composantes principales est une transformation orthogonale (rotation), qui permet d'exprimer les données dans un nouveau repère. Les données projetées dans la nouvelle base sont décorrélées. Aussi, l'expression de la matrice de covariance de ces données dans la nouvelle base sera diagonale.

Une décomposition en valeurs propres de la matrice de covariance $\Sigma_{\mathbf{X}}$ permet de diagonaliser cette dernière. Les vecteurs propres obtenus forment notre nouvelle base, alors que les valeurs propres représentent la variance des données pour cette base. Notons que les vecteurs propres sont ordonnés selon un ordre croissant de leur valeurs propres correspondantes.

L'image \mathbf{X} est alors projetée sur les vecteurs de la nouvelle base, pour obtenir l'image \mathbf{Y} formée des composantes principales. Comme précisé ci-dessus, seules les premières composantes de \mathbf{Y} sont utilisées pour la classification, puisqu'elles correspondent aux variances les plus grandes.

Cette opération de réduction de dimensions réduit le temps d'exécution de l'algorithme des *k-means*, sans détériorer ses performances.

Le nombre des composantes retenues pour la classification dépend de l'image traitée. Nous avons constaté que pour nos images, l'utilisation des trois premières composantes était suffisante pour obtenir une bonne classification.

Nous avons choisi l'algorithme des *k-means* pour réaliser notre classification, d'une part parce qu'il s'agit d'un algorithme non-supervisé. Il sera donc facilement adapté pour un grand nombre d'images hyperspectrales. D'autre part, cet algorithme est l'un des plus rapides [62].

Pour les N pixels de l'image \mathbf{X} , chacun représenté par ses trois premières composantes principales, l'algorithme des *k-means* suit les étapes suivantes :

1. On génère les centroïdes pour les k -classes.
2. On calcule pour chaque pixel de l'image sa distance par rapport à chaque centroïde.
3. On attribue chaque pixel \mathbf{x} à la classe dont le centroïde lui est le plus proche. Si la distance minimale à tous les centroïdes est supérieure à un seuil prédéfini D_{max} : on définit alors une nouvelle classe ayant comme centroïde le pixel \mathbf{x} , et on reprend à l'étape 2.

4. On recalcule les positions des nouveaux centroïdes, après les différentes attributions des pixels.
5. On répète les étapes 2 à 4, jusqu'à atteindre la convergence.
6. On réattribue une dernière fois chaque pixel \mathbf{x} à la classe dont le centroïde lui est le plus proche.

À la fin de cette boucle, nous obtenons N_C classes dans la zone hors panache et N_{CP} classes contenant du panache.

4.2.4 Estimation de la luminance de fond (sans panache)

La plupart des méthodes de quantification de panache supposent que la luminance de fond L_{off} ne peut être estimée pour les pixels contenant du panache. Néanmoins, *Niu et al.* font remarquer qu'en présence de panache, la luminance totale L_{on} est sensiblement égale à la luminance de fond L_{off} pour toutes les bandes spectrales « transparentes ». À savoir, les bandes où les gaz présents dans le panache ne signent pas.

Niu et al. [25] proposent d'utiliser un algorithme de sélection de bandes afin de déterminer les bandes spectrales « transparentes » pour les gaz du panache. L'estimation de la luminance de fond se fait par une détermination des coefficients de décomposition en composantes principales (cf. eq. 3.18) à partir des valeurs de la luminance totale sur les bandes « transparentes » (cf. eq. 3.48). Cette méthode a déjà été détaillée dans le chapitre précédent. *Niu et al.* ont conclu que leur méthode d'estimation de la luminance de fond est assez précise, puisque l'erreur moyenne d'estimation reste inférieure à 10 % pour les cas étudiés.

L'inconvénient de cette approche est qu'elle ne tient pas compte de la différence de température entre l'atmosphère et le panache. En effet, lorsque le panache a une température différente de celle de l'atmosphère, le signal dû aux gaz atmosphériques est modifié. Par conséquent, la luminance mesurée n'est plus égale à la luminance de fond, même pour les bandes « transparentes » pour les gaz du panache. Ainsi, l'erreur introduite est d'autant plus grande que l'écart de température est grand.

Lors de nos travaux, nous avons adopté une autre approche pour l'estimation de L_{off} . En partant d'une mise en correspondance entre les classes de la zone sans panache et celles du panache, nous pouvons estimer la luminance de fond. En effet, nous considérons que le seuil D_{max} est fixé de sorte que les pixels appartenant à la même classe possèdent les mêmes caractéristiques (température et émissivité du sol, profils atmosphériques, ...). Ainsi, au sein d'une classe donnée la luminance de fond L_{off} est très proche d'un pixel à un autre.

La zone de l'image contenant du panache a une petite extension spatiale, par rapport au reste de l'image. Par conséquent, cette zone ne contient qu'un petit nombre de classes. Il est donc approprié de considérer que les classes du panache sont des extensions des classes de la zone hors panache ;

dans la mesure où leurs pixels respectifs ont les mêmes caractéristiques, à la seule différence de la présence de gaz de pollution.

Pour chaque classe du panache CP_i , le spectre moyen de ses pixels est calculé, puis comparé aux spectres moyens des classes de la zone hors panache $(C_j)_{1 \leq j \leq N_C}$. Précisons que cette comparaison ne fait intervenir que les bandes spectrales où les gaz cibles absorbent peu (absorbances inférieures à 1 % de l'absorbance maximale sur tout le spectre).

La classe hors panache C_{j*} ayant la distance minimale de la classe CP_i , et cette dernière sont considérées comme étant les mêmes. Ainsi, pour un pixel \mathbf{x}_p appartenant à la classe CP_i , nous supposons que sa luminance de fond $L_{off}(\mathbf{x}_p)$ est égale à la luminance moyenne des pixels appartenant à la classe C_{j*} .

4.2.5 Estimation des paramètres de l'atmosphère

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent, les profils atmosphériques sont considérés constants sur toute la scène. Ainsi, les termes atmosphériques : la transmission atmosphérique (τ_{atm}), la luminance atmosphérique montante (L_{atm}^ϵ) et l'éclairement descendant au sol (L_d) ne seront calculés qu'une seule fois. Ces termes dépendant des profils de pression et température atmosphériques et des espèces chimiques composant l'atmosphère. Dans les bandes MWIR et LWIR, c'est essentiellement la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et l'ozone qui ont le plus d'impact sur les trois termes atmosphériques.

Notre démarche, consiste à déduire les profils atmosphériques de pression, de température, et de vapeur d'eau à partir des données météorologiques de la scène. Les profils de CO_2 et de O_3 ont été déduits de profils typiques représentatifs des profils climatologiques de l'hémisphère nord pour ces deux composants.

Des simulations MODTRAN avec ces entrées sont alors lancées, afin de retrouver les trois termes atmosphériques qui nous intéressent.

4.2.6 Estimation des paramètres du sol

Après l'estimation de la luminance de fond L_{off} des pixels contenant du panache, ainsi que des termes atmosphériques (τ_{atm} , L_{atm}^ϵ et L_d), il est à présent possible de retrouver les paramètres du sol à l'aide d'une approche de type TES (*Temperature and Emissivity Separation*). En effet, à partir de l'équation du transfert radiatif en absence du panache (eq. 1.9), une famille de solution pour l'émissivité spectrale ϵ_{sfc}^* correspondant aux différentes température de sol T_{sfc}^* possibles s'écrit :

$$\epsilon_{sfc}^* = \frac{L_{off} - L_{atm}^\epsilon - L_d \tau_{atm}}{B(T_{sfc}^*) \tau_{atm} - L_d \tau_{atm}} \quad (4.1)$$

Pour lever cette indétermination, nous utilisons la méthode ISSTES [71] que nous avons introduite dans le chapitre précédent. Cette méthode introduit un critère sur la forme spectrale de l'émissivité. On cherche alors la température du sol qui donne l'émissivité la plus lisse spectralement. Il existe plusieurs implémentations du critère de régularité de l'émissivité. *Kanani* [57] a montré que la méthode ISSTES était très robuste et très peu dépendante du critère de régularité spectrale utilisé, lorsqu'elle est appliquée sur des données réelles. Nous avons donc repris le critère de SpSm, qui consiste à minimiser la dérivée première de l'émissivité.

La température du sol est initialisée comme étant la température de brillance maximale obtenue sur tout le spectre d'intérêt.

$$T_{sf,0} = \max_{\lambda} (B^{-1}(\lambda, L_{off})) \quad (4.2)$$

Ensuite, pour chaque itération i la température optimale $T_{sf,i}$ est recherchée sur un intervalle ΔT_i autour de la température obtenue à l'itération $i - 1$. La largeur de cet intervalle est à chaque fois divisée par 10, afin d'augmenter la précision de l'optimisation.

Cette méthode est appliquée à nos images synthétiques en LWIR, ainsi qu'aux images réelles acquises par l'instrument de TELOPS. Pour les images synthétiques en bande MWIR, on applique ISSTES uniquement sur la bande $[4.3 - 5 \mu m]$ afin de déterminer la valeur de la température optimale. Ensuite, nous utilisons la formule 4.1 afin de trouver l'émissivité sur l'ensemble de la bande MWIR. Notons qu'étant donné l'impact de l'éclairement solaire en bande MWIR, la formule 4.1 est modifiée pour intégrer le terme E_{soleil}^{\downarrow} . La luminance due à l'éclairement descendant s'écrit alors : $L_d + \frac{E_{soleil}^{\downarrow}}{\pi}$.

Nos scènes synthétiques ont été générées avec l'hypothèse d'un sol lambertien, le facteur de forme f (cf. § 3.3.3) utilisé dans la méthode SmaC est égal à 1 dans notre cas.

En revanche, si nous devons travailler sur des images d'acquisitions réelles en bande $[3 - 5 \mu m]$, il faudrait appliquer la méthode SmaC pour déterminer le facteur de forme.

4.2.7 Estimation des paramètres du panache

Algorithme d'inversion : Méthode CONLIE

Notre approche vise à retrouver conjointement les concentrations des gaz et les températures de chaque couche du panache et pour chaque pixel de la scène. On définit alors le vecteur des grandeurs qu'on cherche à estimer par :

$$\theta = \begin{bmatrix} q_{g,i,j,l} \\ \Delta T_{i,j,l} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Où : $q_{g,i,j,l}$ est la concentration du gaz g pour la couche l du pixel $[i, j]$ et $\Delta T_{i,j,l}$ l'écart de température du panache par rapport à l'atmosphère pour la couche l du pixel $[i, j]$.

Par ailleurs, étant donnée une image hyperspectrale en luminance $\mathbf{L}_{i,j,\lambda}$ avec les dimensions spatiales (i,j) et la dimension spectrale λ , nous pouvons extraire après une étape de détection de panache, un ensemble de N_p pixels contenant des gaz cibles. On introduit le vecteur \mathbf{M} constitué par la concaténation des luminances mesurées \mathbf{L}_λ des N_p pixels avec panache. \mathbf{M} est alors un vecteur de $N_p \cdot N_B$ éléments, exprimé ainsi :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{i_1, j_1, \lambda_1} \\ \vdots \\ \mathbf{L}_{i_1, j_1, \lambda_{N_B}} \\ \mathbf{L}_{i_2, j_2, \lambda_1} \\ \vdots \\ \mathbf{L}_{i_{N_p}, j_{N_p}, \lambda_{N_B}} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Nous abordons le problème d'estimation des concentrations et températures des gaz au sein du panache comme une optimisation d'une fonction coût : on parle alors d'estimation optimale. Cette fonction coût inclut des contraintes sur les grandeurs recherchées, et est minimisée à l'aide d'une régression non-linéaire itérative. Nous avons baptisé notre méthode CONLIE pour *Constrained Optimal Non-Linear Iterative Estimation*.

La fonction coût a été définie comme suit :

$$\chi(\theta) = (\mathbf{M} - \mathbf{F}(\theta))^T \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{M}}^{-1} (\mathbf{M} - \mathbf{F}(\theta)) + (\theta - \theta_{apriori})^T \mathbf{R} (\theta - \theta_{apriori}) \quad (4.5)$$

Avec \mathbf{M} le vecteur de mesures incluant l'information spatiale et spectrale, θ est le vecteur cible contenant les paramètres à retrouver. $\mathbf{F}(\cdot)$ est une fonction non-linéaire calculée par un modèle de transfert radiatif. Ainsi, $\mathbf{Y} = \mathbf{F}(\theta)$ est le vecteur des luminances simulées avec le jeu de paramètres θ . $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{M}}^{-1}$ est la matrice modélisant le bruit sur les données. $\theta_{apriori}$ est le vecteur des paramètres *a priori*. Enfin, \mathbf{R} est la matrice de régularisation, permettant de prendre en compte les contraintes.

La matrice $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{M}}^{-1}$ est une matrice diagonale par bloc car les pixels sont indépendants les uns par rapport aux autres en terme de bruit. Cette matrice peut donc être estimée par :

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{M}}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1^{-1} & & & \\ & \mathbf{D}_2^{-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{D}_{N_p}^{-1} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Avec : $\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}_2 = \dots = \mathbf{D}_{N_p} = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_{N_B}^2\}$, où σ_i est l'erreur moyenne de la luminance spectrale mesurée dans la bande i .

La minimisation du premier terme de la fonction coût : $(\mathbf{M} - \mathbf{F}(\theta))^T \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{M}}^{-1} (\mathbf{M} - \mathbf{F}(\theta))$ exprime notre objectif d'obtenir un jeu de paramètres θ conduisant à une luminance simulée proche des mesures. Ce terme est appelé terme d'attache aux données. En outre, le second terme : $(\theta - \theta_{apriori})^T \mathbf{R} (\theta - \theta_{apriori})$

permet d'obtenir une solution cohérente avec les contraintes imposées en tenant compte des connaissances *a priori*.

La matrice de régularisation \mathbf{R} inclut des contraintes spatiales à la fois sur les concentrations et sur la température des gaz du panache.

Pour trouver l'optimum de la fonction coût, nous avons eu recours à l'algorithme de Levenberg-Marquardt [83]. En effet, la robustesse de cet algorithme fait de lui un choix intéressant pour la résolution des problèmes de régression non-linéaire. Les paramètres recherchés sont obtenus grâce à l'équation itérative suivante :

$$\theta_{i+1} = \theta_i + [\mathbf{J}^T \Sigma_{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{J} + \mathbf{R} + \lambda_d \cdot \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})]^{-1} \times [\mathbf{J}^T \Sigma_{\mathbf{M}}^{-1} (\mathbf{M} - \mathbf{F}(\theta_i)) - \mathbf{R} (\theta_i - \theta_{\text{apriori}})] \quad (4.7)$$

Où : i indique le numéro de l'itération, λ_d est le facteur d'amortissement de l'algorithme Levenberg-Marquardt. \mathbf{J} est la matrice Jacobienne de la fonction $\mathbf{F} : \mathbf{J}(i, j) = \left(\frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial \theta_j} \right)_{i,j}$.

Initialisation de l'algorithme

L'algorithme de Levenberg-Marquardt nécessite à la fois la définition d'un jeu de paramètres initial (θ_0) et d'un vecteur de paramètres *a priori* (θ_{apriori}), déduit des contraintes physiques du problème. Comme la majorité des algorithmes d'optimisation, Levenberg-Marquardt n'apporte aucune garantie de converger vers l'optimum global de la fonction coût, lorsque celle-ci n'est pas convexe. Si l'initialisation n'est pas très pertinente, l'algorithme ne donnera qu'un optimum local. On comprend donc toute l'importance de l'initialisation de cet algorithme.

Dans ce qui suit, nous présenterons, les travaux effectués sur l'initialisation de l'algorithme en bande LWIR.

Nous avons opté pour une initialisation obtenue à partir d'une régression linéaire pixel-à-pixel. Dans le chapitre précédent, nous avons présenté différentes méthodes linéaires de caractérisation de panache. Celle que nous avons retenue pour l'initialisation de l'algorithme de Levenberg-Marquardt est la méthode *Ordinary Least-Squares* (OLS) développée par Young dans l'article [73]. Contrairement à Young, nous ne négligerons pas la participation de l'éclairement dans le signal différentiel. Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, ce terme peut être très important.

La méthode OLS consiste à déterminer le contraste thermique à partir d'une régression linéaire sur la luminance différentielle. En effet, l'hypothèse du panache mince optiquement permet d'écrire

(cf. eq.3.32) :

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{L} &= \mathbf{L}_{\text{on},\mathbf{C}} - \widehat{\mathbf{L}_{\text{off},\mathbf{C}}} \\ &= \mathbf{K} \times \mathbf{C} + \mathbf{e}\end{aligned}\tag{4.8}$$

Avec $\mathbf{L}_{\text{on},\mathbf{C}}$ la luminance totale d'un pixel avec panache après correction atmosphérique. $\widehat{\mathbf{L}_{\text{off},\mathbf{C}}}$ est l'estimation de la luminance de fond après correction atmosphérique. \mathbf{K} est la matrice contenant les coefficients d'absorption des différents gaz, \mathbf{C} le vecteur contenant les contrastes thermiques des différents gaz présents dans le panache et \mathbf{e} le vecteur erreur à minimiser. La solution formelle de cette régression est (cf. eq.3.33) :

$$\mathbf{C} = (\mathbf{K}^T \Sigma_{\Delta \mathbf{L}}^{-1} \mathbf{K})^{-1} (\mathbf{K}^T \Sigma_{\Delta \mathbf{L}}^{-1} \Delta \mathbf{L})\tag{4.9}$$

$\Sigma_{\Delta \mathbf{L}}$ est la matrice de covariance de $\Delta \mathbf{L}$.

Une fois le contraste thermique retrouvé par cette régression, la concentration intégrée de chaque gaz est alors obtenue en utilisant l'équation ci-dessous qui lie ces différentes grandeurs.

$$\begin{aligned}C_g &= q_g \cdot [B(T_p, \overline{\lambda}_g) - \epsilon_{sfc}(\overline{\lambda}_g) \cdot B(T_{sfc}, \overline{\lambda}_g) \\ &+ (1 - \epsilon_{sfc}(\overline{\lambda}_g)) (B(T_p, \overline{\lambda}_g) - 2 \cdot L_d(\overline{\lambda}_g))]\end{aligned}\tag{4.10}$$

Où $\overline{\lambda}_g$ est la longueur d'onde équivalente définie pour le g^{eme} gaz par :

$$\overline{\lambda}_g = \frac{\int \lambda \cdot \kappa_g(\lambda) d\lambda}{\int \kappa_g(\lambda) d\lambda}\tag{4.11}$$

Cependant, il est nécessaire de déterminer préalablement la température du panache T_p . Dans le paragraphe suivant nous allons présenter différentes approches possibles permettant la détermination de la température du panache.

Détermination de la température du panache

Dans la littérature très peu d'articles abordent le problème de la détermination de la température du panache. Souvent les auteurs considèrent cette dernière comme connue et constante pour tout le panache. Pourtant les erreurs sur la température du panache, peuvent se propager et induire des erreurs importantes lors de la quantification des gaz [84].

Les algorithmes développés par *Gallagher et al.* [72], présentés dans le chapitre précédent, admettent un équilibre thermique entre le panache et l'atmosphère. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir une estimation de la température du panache. *Niu et al.* [25] supposent que la température du panache est constante et connue sur tout le panache.

Pour estimer la température de panache *Young* [73] exprime le contraste thermique d'un pixel comme une combinaison linéaire de la luminance de fond. Le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine

s'écrivent en fonction de la concentration intégrée des gaz présents dans le panache, ainsi que de la température de celui-ci. Young admet que ces derniers sont constants dans le voisinage proche d'un pixel. Ce qui permet de les déterminer à partir d'une régression linéaire sur les valeurs du contraste thermique et de la luminance de fond au voisinage du pixel d'intérêt.

Turcotte et al. [22] réadaptent l'algorithme GLS (cf. 3.4.2), afin de pouvoir estimer la température du panache. L'approche employée consiste à supposer une valeur pour la température du panache, puis d'estimer la concentration intégrée du panache en employant le GLS. La luminance correspondante à ce couple (T_p, q) est alors comparée à la luminance mesurée. Ces étapes sont alors appliquées itérativement, jusqu'à converger vers la température de panache qui minimise l'erreur en luminance. Des mesures de terrain [85] montrent que la différence entre la température du panache et celle de l'atmosphère ambiante ne varie que très peu au voisinage de la source. Lorsqu'on s'éloigne de la source, cette différence décroît avec l'inverse de la distance à la source. *Turcotte et al.* suggèrent d'améliorer l'estimation de la température du panache, en introduisant une interpolation bayésienne. Cette dernière permet de déterminer T_p , pour les pixels ne présentant pas de minimum de l'erreur entre la luminance prédite et celle observée.

Lors de notre thèse nous avons développé une nouvelle approche pour l'estimation de la température du panache. Elle est basée sur une connaissance *a priori* du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère de la scène. Cette hypothèse n'est pas très contraignante, dans la mesure où nous avons expliqué précédemment comment s'effectue la détermination des profils atmosphériques des scènes synthétiques et réelles. Considérons dans un premier temps, une atmosphère constituée uniquement des gaz atmosphériques (vapeur d'eau, dioxyde de carbone et ozone). La couche basse de cette atmosphère, d'une épaisseur de H_p , est homogène et sa température est de T_{off} . La présence d'un panache de gaz dans la couche basse s'accompagne souvent d'une augmentation (ou d'une baisse) de la température de celle-ci.

Quitte à ne travailler que sur les bandes transparentes des gaz émis dans le panache, nous considérons maintenant que la présence du panache n'a comme seul impact que le changement de la température de la couche du panache. En présence de panache, la température de cette couche est de $T_{on} = T_{off} + \Delta T$. La figure 4.2 illustre le bilan radiatif dans les deux cas d'atmosphère que nous venons de définir ci-dessus.

La luminance en entrée du capteur s'écrit pour ces deux cas comme suit :

$$\begin{aligned} L_{atmo}(\lambda) &= L_a^\epsilon(\lambda) + L_p^\epsilon(\lambda) + L_{sfc}^r(\lambda) + L_{sfc}^\epsilon(\lambda, T_{sfc}) \\ &= L_a^\uparrow + \epsilon_p \cdot B(T_{atmo}) \cdot \tau_a + (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot \frac{E_{sfc,atmo}^\downarrow}{\pi} \cdot \tau_p \cdot \tau_a + \epsilon_{sfc} \cdot B(T_{sfc}) \cdot \tau_p \cdot \tau_a \end{aligned} \quad (4.12)$$

Ici *atmo* est à remplacer par *off* ou *on*, selon l'atmosphère étudiée. Par ailleurs, pour simplifier nous n'avons pas détaillé l'expression de l'éclairement descendant au sol $E_{sfc,atmo}^\downarrow$. Ce dernier peut

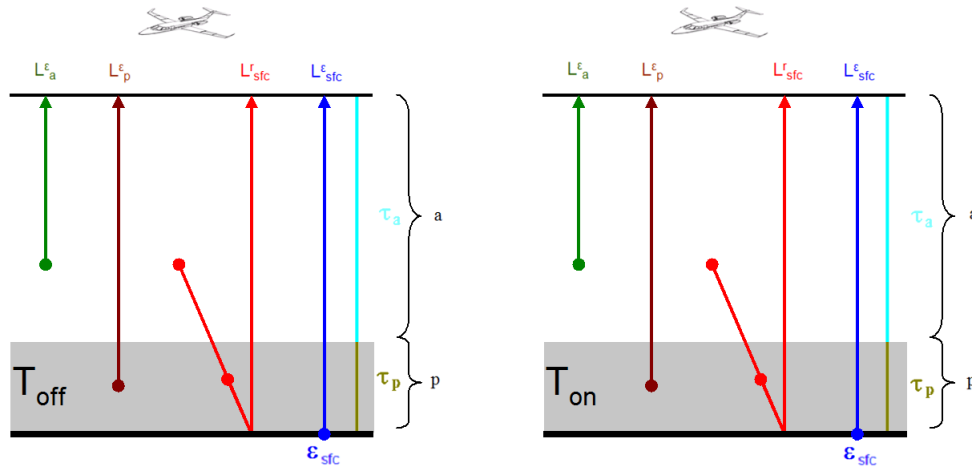


FIGURE 4.2 – Illustration du bilan radiatif dans une atmosphère avec une couche de panache à une température de T_{off} (à gauche) et la même atmosphère avec une augmentation de la température de la couche du panache $T_{on} = T_{off} + \Delta T$ (à droite).

se calculer en intégrant les luminances vues depuis le sol selon un angle donné. Puis en séparant les participations des deux couches atmosphériques (a et p).

$$\begin{aligned} E_{sfc,atmo}^{\downarrow} &= \int_{\Omega} L_{atmo}^{\downarrow}(\theta, \phi) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \\ &= \int_{\Omega} \left[L_a^{\downarrow}(\theta) \cdot \tau_p(\theta) + \epsilon_p(\theta) \cdot B(T_{atmo}) \right] \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \end{aligned} \quad (4.13)$$

Le deuxième terme de l'intégrale peut se calculer facilement en écrivant : $\epsilon_p(\theta) \approx \frac{\epsilon_p(0)}{\cos(\theta)}$. On obtient alors :

$$E_{sf c,atmo}^{\downarrow} = \int_{\Omega} L_a^{\downarrow}(\theta) \cdot \tau_p(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi + 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_p(0) \cdot B(T_{atmo}) \quad (4.14)$$

Afin de déterminer la valeur de l'écart de température (ΔT) entre les deux atmosphères, nous allons nous intéresser à la luminance différentielle $\Delta L = L_{on} - L_{off}$. On négligera dans ce qui suit la variabilité du coefficient d'absorption des gaz atmosphériques en fonction de la température (cf. figure 4.3). Bien que les variations du coefficient d'absorption restent inférieures à $1.03 \cdot 10^{-6} \text{ ppm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, les valeurs des concentrations en vapeur d'eau mises en jeu dans les profils atmosphériques, induisent des variations très importantes au niveau des transmissions.

Cette hypothèse, valable pour des ΔT petits, revient à considérer que : ϵ_p et τ_p sont les mêmes pour les deux atmosphères.

Sous cette hypothèse la luminance différentielle s'écrit :

$$\Delta L = \epsilon_p \cdot [B(T_{on}) - B(T_{off})] \cdot [1 + 2 \cdot (1 - \epsilon_{sf_c}) \cdot \tau_p] \cdot \tau_a \quad (4.15)$$

La température T_{on} de la couche du panache après changement de température, peut être re-

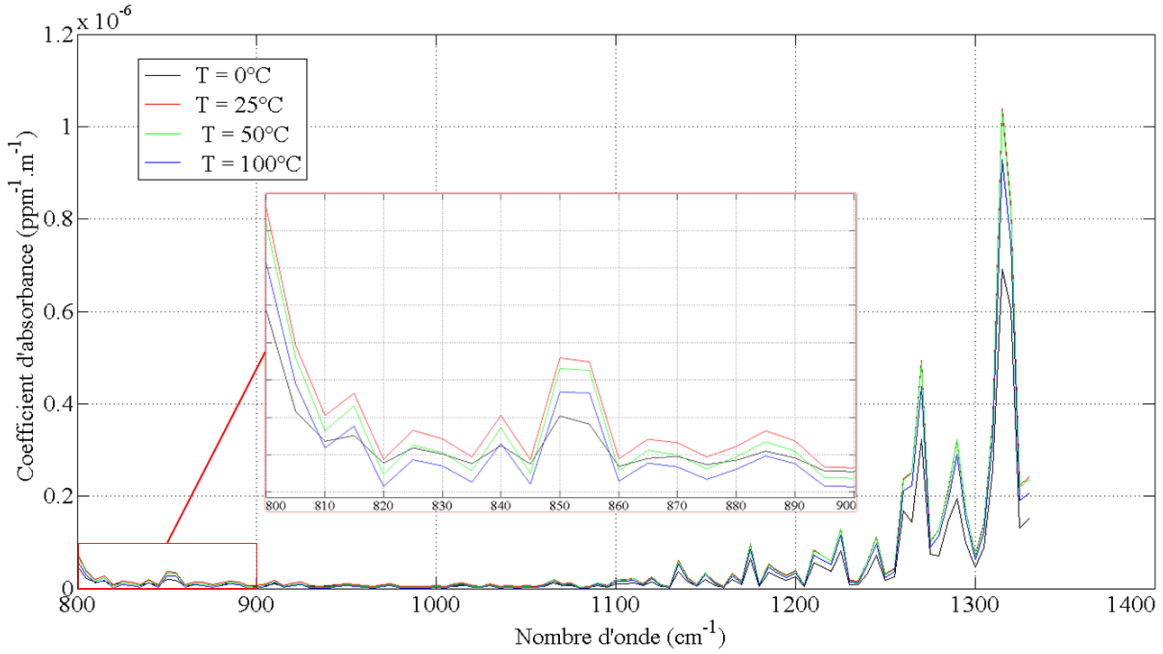


FIGURE 4.3 – Illustration de la dépendance du coefficient d'absorption de la vapeur d'eau en fonction de la température. Ce coefficient a été tracé pour quatre températures différentes : 0°C (en noir), 25°C (en rouge), 50°C (en vert) et 100°C (en bleu). Un zoom a été effectué pour la bande spectrale entre 800 et 900 cm^{-1} , car cette dernière a été choisie pour la détermination de la température du panache.

trouvée grâce à la relation suivante :

$$B(T_{on}) = B(T_{off}) + \frac{\Delta L}{\epsilon_p \cdot [1 + 2 \cdot (1 - \epsilon_{sfc}) \cdot \tau_p] \cdot \tau_a} \quad (4.16)$$

Puisque nous nous sommes placés dans le cas où les profils atmosphériques sont connus, les grandeurs ϵ_p , τ_p et τ_a sont alors facilement calculées par MODTRAN.

Notre première approche d'estimation de la température du panache (T_{on}) consiste tout simplement à calculer, sur les bandes sélectionnées, le maximum des températures obtenues grâce à la loi de Planck inverse utilisée pour la formule 4.16.

Étant donné que la plupart des matériaux des scènes ont des émissivités proches de 1. Nous avons simplifié la formule 4.16, pour obtenir :

$$B(T_{on}) = B(T_{off}) + \frac{\Delta L}{\epsilon_p \cdot \tau_a} \quad (4.17)$$

De la même manière que précédemment nous avons déduit une estimation de la température du panache (T_{on}) à partir de cette deuxième formule.

Enfin, nous avons développé une troisième approche pour l'estimation de la température du panache. En admettant les hypothèses d'un panache mince et d'un fond spectralement plat, et en

considérant la loi de corps noir assez stable en température, la luminance différentielle $\Delta \mathbf{L}$ peut se linéariser ainsi [86] :

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{L} &= \mathbf{L}_{\text{on}} - \widehat{\mathbf{L}_{\text{off}}} \\ &\approx \sum_{g=1}^{N_g} q_g \kappa_g(\lambda) (T_{\text{on}} - T_{\text{sfc}}) \dot{B}(T_{\text{sfc}}, \lambda) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Où $\dot{B} = \frac{\partial B(T, \lambda)}{\partial T}$. En considérant les profils atmosphériques connus, la concentration intégrée $q_{\text{H}_2\text{O}}$ est directement obtenue à partir du profil de la vapeur d'eau.

On pourra alors estimer la température du panache à partir de la concentration intégrée de la vapeur d'eau, à l'aide de la formule suivante :

$$T_{\text{on}} = T_{\text{sfc}} + \frac{C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \int \kappa_g(\lambda) d\lambda}{q_{\text{H}_2\text{O}} \int \dot{B}(T_{\text{sfc}}, \lambda) \cdot \kappa_g(\lambda) d\lambda} \quad (4.19)$$

Ici $C_{\text{H}_2\text{O}}$ représente le contraste thermique dû à la vapeur d'eau, tel que nous l'avons défini précédemment.

Par la suite, nous allons comparer les trois méthodes d'estimation de la température du panache, afin de sélectionner celle donnant les meilleurs résultats. La méthode utilisant la formule 4.16 sera désignée par la **méthode 1**. La **méthode 1bis** est celle qui exploite la formule 4.17. Enfin, la **méthode 2** est celle issue de la formule 4.19.

Choix des contraintes

Après avoir expliqué comment nous avons procédé pour l'initialisation de l'algorithme CONLIE, nous allons nous intéresser dans ce paragraphe à la construction du modèle *a priori* du panache. Cette étape est très délicate. Elle doit être adaptée d'une image à une autre, selon les connaissances *a priori* dont nous disposons.

De manière générale, les contraintes introduites porteront sur les évolutions spatiales et verticales de la concentration et de la température au sein du panache. Comme nous l'avons fait précédemment, on considérera que ces deux grandeurs suivent la même loi de distribution.

Plusieurs considérations peuvent entrer en jeu lors de la construction de notre panache *a priori*. Les paramètres de l'émission, les conditions météorologiques et la géométrie 3D des installations de la scène sont les principaux facteurs impactant la distribution géométrique du panache. La construction de notre *a priori*, doit donc utiliser au mieux les informations disponibles sur ces trois facteurs.

Une première approche consiste à considérer que le panache étudié suit un modèle gaussien. Certains paramètres de ce modèle peuvent être directement déduits des conditions météorologiques

(vitesse du vent, couverture nuageuse,...), comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2. Par ailleurs, si des informations sur les facteurs d'émission (vitesse d'éjection, dimensions de la cheminée, débit d'émission,...) sont disponibles, il sera facile de construire complètement le modèle *a priori* du panache. En revanche, en absence de ces informations, deux options s'offrent à nous. La première solution consiste à utiliser l'inversion initiale (inversion linéaire) pour compenser les informations manquantes ; au risque d'introduire d'importantes sources d'erreurs, étant donné l'imprécision de cette première estimation des paramètres du panache. La deuxième solution serait de se contenter uniquement de certaines contraintes sur la distribution 3D du panache. En d'autres termes, on n'aura pas un modèle *a priori* du panache, mais plutôt des contraintes sur la variation de la concentration et de la température au sein du panache, aussi bien horizontalement que verticalement.

Pour des panaches réels, la distribution gaussienne n'est pas toujours la meilleure solution pour bien les décrire. Il sera donc plus judicieux d'utiliser d'autres modèles *a priori*. Par exemple, un modèle de décroissance des paramètres du panache avec l'inverse de la distance peut être envisagé, comme le préconisent *Turcotte et al.* [22] en se basant sur les mesures expérimentales présentées par *Jellison et al.* [85].

4.3 Validation et analyse des différentes étapes de la caractérisation du panache.

4.3.1 Introduction

Après avoir exposé le détail des différentes étapes constituant notre outil de caractérisation des panaches de gaz, nous allons dans cette section examiner la performance de chacune de ces étapes. Cette étude est réalisée en utilisant les images hyperspectrales de scènes synthétiques. En effet, pour évaluer les algorithmes composant notre outil de caractérisation de panaches, nous comparons les résultats obtenus par ces algorithmes avec les données utilisées lors de la génération des scènes en question.

Les images utilisées lors de cette validation sont celles de la raffinerie (scénarii 1a et 1b) et de la cimenterie (scénarii 2a et 2b), présentées dans la section 2.4. L'image de la déchetterie n'a pas été exploitée pour cette étude car les concentrations des gaz sont faibles. Ils ne peuvent donc pas être détectés, comme nous allons le voir par la suite.

4.3.2 Étude de la détection du panache

Lors de la création des scènes synthétiques, nous disposons de la distribution 3D des concentrations des différents gaz présents. À partir de ces distributions, nous calculons pour chacun des gaz,

les concentrations intégrées verticalement. Il est alors nécessaire de définir des seuils de détection sur ces concentrations intégrées. En effet, étant donné les performances des instruments hyperspectraux, il est impossible de détecter la présence d'un gaz si sa concentration est inférieure à une certaine valeur. Le signal dû uniquement à ce gaz est dans ce cas très faible et se confond avec le bruit instrumental.

Détermination des seuils de détection

Le seuil de détection pour un gaz est étroitement lié à son absorption, mais aussi à la valeur du bruit de mesure de l'instrument utilisé. Dans les tableaux 2.4 et 2.5, nous avons présenté les bruits de mesures des différents instruments d'acquisition dans les bandes MWIR et LWIR. Pour tous ces instruments, la NEDT est inférieure à $0.5\ K$. Il est donc judicieux de considérer que pour un gaz donné, la détection n'est effective que si le maximum de la signature de ce gaz (en température de brillance) dépasse la valeur de $0.5\ K$.

Nous avons alors réalisé une série de simulations à l'aide de MODTRAN, pour nous permettre de trouver les concentrations intégrées pour lesquelles le maximum de la signature atteint la valeur de $0.5\ K$. Ces concentrations intégrées représenteront par la suite les seuils de détection de leurs gaz respectifs. Les simulations ont été réalisées pour un scénario simple, contenant un panache de gaz d'une hauteur de $100\ m$. L'atmosphère considérée et la géométrie de l'acquisition sont les mêmes que celles sélectionnées pour nos scènes hyperspectrales. La température du sol et son émissivité ont été prises égales à $300.00\ K$ et 0.9 respectivement.

Par ailleurs, une augmentation de la température au niveau du panache (ΔT_p) a été introduite. Trois configurations ont alors été étudiées : $0\ K$, $1\ K$ et $5\ K$. Pour chacun de ces cas et pour tous les gaz présents dans nos scénarii, une centaine de simulations MODTRAN a été effectuée pour différentes concentrations intégrées. Ces dernières varient d'un gaz à un autre, elles sont choisies de manière à encadrer la valeur du seuil de détection, pour chaque gaz et pour chaque configuration du ΔT_p . Pour chaque simulation, nous avons calculé le maximum de la signature spectrale (différence entre la température de brillance avec panache et sans panache). Puis nous avons déterminé, par interpolation, la concentration intégrée conduisant à un maximum de signature égale à $0.5\ K$.

Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau 4.1.

Il faut noter que ces seuils de détection dépendent intrinsèquement des données d'entrée des simulations qui ont permis de les calculer. En effet, l'expression de la signature fait intervenir à la fois la transmission de l'atmosphère et l'émissivité du sol. Pour simplifier, nous considérerons que ces seuils restent les mêmes pour tous les pixels de nos scènes.

Gaz	MWIR			LWIR		
	0 <i>K</i>	1 <i>K</i>	5 <i>K</i>	0 <i>K</i>	1 <i>K</i>	5 <i>K</i>
N ₂ O	36.3	30.85	19	153	136.8	92.8
CO	305.1	251.9	146.2	-	-	-
CH ₄	428.1	298.5	137.2	406.4	338	202.5
NO	-	-	-	-	-	-
SO ₂	1798.6	1565.4	1009.3	263.1	246.2	194.5
NO ₂	376.9	323	200.9	4141	3925	3146
NH ₃	13031	7437	2742	22.4	21.2	17

TABLE 4.1: Présentation des différents seuils de détection pour les gaz présents dans nos images synthétiques. Les seuils obtenus correspondent aux concentrations intégrées (exprimées en *ppm · m*), pour lesquelles le maximum de la signature est égale à 0.5 *K*.

Performance de la détection

Une fois les seuils de détection déterminés, des masques de détection sont calculés à partir des concentrations intégrées des différents gaz présents dans nos scènes hyperspectrales. Lors de notre détection de panaches, nous nous sommes focalisés sur la présence ou non de gaz de pollution, sans distinguer ces gaz selon leurs espèces respectives. Ainsi, la détermination de la présence d'un gaz donné, n'est qu'un résultat intermédiaire de notre étude.

Les figures 4.4 et 4.5 illustrent les résultats obtenus par la détection des gaz pour les scènes synthétiques, respectivement dans les bandes MWIR et LWIR. Pour les pixels bleus (absence de panache) et verts (présence de panache), le résultat de la détection coïncide avec celui du seuillage sur les concentrations intégrées. En revanche, une divergence est observée pour les pixels oranges et cyans ; où l'algorithme de détection indique la présence de gaz pour les premiers et son absence pour les seconds.

Les matrices de confusion ci-dessous montrent que les résultats obtenus avec l'algorithme de détection sont cohérents avec les seuils de détection des gaz utilisés. Seul le scénario 2b en bande LWIR, conduit à un taux de détection inférieur à 70 %.

Les résultats présentés dans les figures 4.4 et 4.5 soulignent bien l'impact de la température du panache et de la composition du sol dans la détection.

Sachant que les seuils utilisés ont été calculés pour un écart nul en température entre le panache et l'atmosphère, on comprend bien que pour certains scénarii, l'algorithme SMF détecte plusieurs pixels ayant des concentrations intégrées inférieures aux seuils de détection des gaz impliqués. En effet, la température de la couche du panache pour ces pixels est supérieure à la température de l'atmosphère à la même altitude. Par conséquent, le seuil de détection pour ces pixels devrait être

plus faible, comme on peut le constater dans le tableau 4.1.

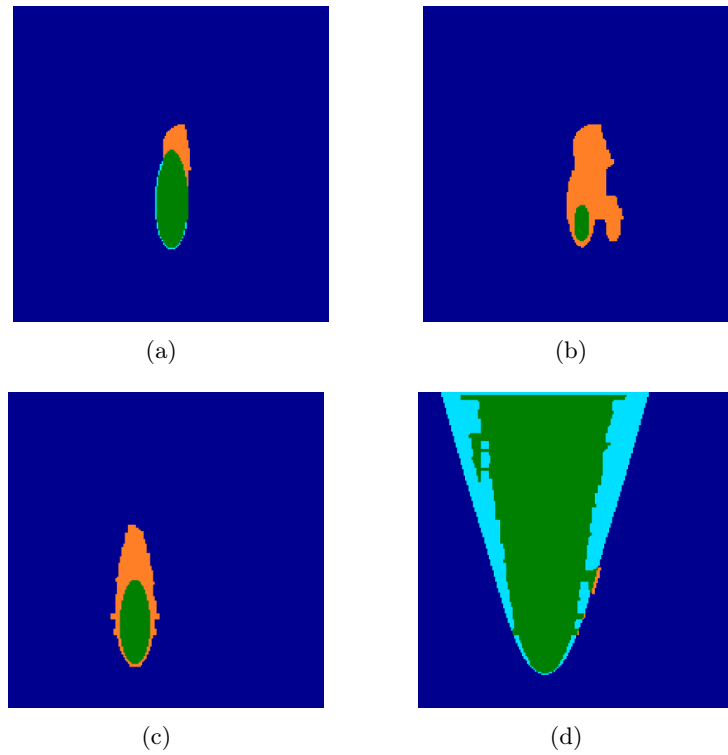


FIGURE 4.4 – Comparaison des résultats de détection des panache dans la bande MWIR sur les scènes synthétiques, par rapport aux seuils de détection (configuration 0 K). (a) : Scénario 1a, (b) : Scénario 1b, (c) : Scénario 2a, (d) : Scénario 2b. Les pixels **verts** et **cyans** ont des concentrations intégrées supérieures aux seuils de détection. Les premiers ont bien été détectés, contrairement aux seconds. En revanche, les concentrations intégrées des pixels **bleus** et **oranges** sont en dessous des seuils de détection. Alors que les pixels **bleus** ne sont pas détectés par notre algorithme, les pixels **oranges** le sont.

Scénario 1a	Non détecté	Détecté
Absence	99.2 %	0.8 %
Présence	6.3 %	93.7 %

Scénario 1b	Non détecté	Détecté
Absence	95.9 %	4.1 %
Présence	0 %	100 %

Scénario 2a	Non détecté	Détecté
Absence	97.5 %	2.5 %
Présence	0 %	100 %

Scénario 2b	Non détecté	Détecté
Absence	99.8 %	0.2 %
Présence	27.7 %	72.3 %

TABLE 4.2: Matrices de confusion pour la détection des gaz des scènes synthétiques dans la bande MWIR.

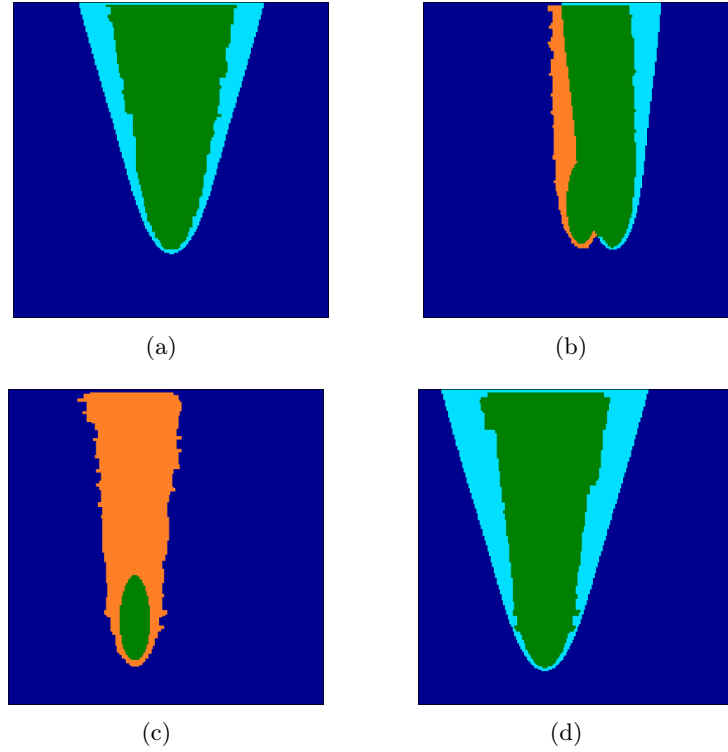


FIGURE 4.5 – Comparaison des résultats de détection des panache dans la bande LWIR sur les scènes synthétiques, par rapport aux seuils de détection (configuration 0 K). (a) : Scénario 1a, (b) : Scénario 1b, (c) : Scénario 2a, (d) : Scénario 2b. Les pixels **verts** et **cyans** ont des concentrations intégrées supérieures aux seuils de détection. Les premiers ont bien été détectés, contrairement aux seconds. En revanche, les concentrations intégrées des pixels **bleus** et **oranges** sont en dessous des seuils de détection. Alors que les pixels **bleus** ne sont pas détectés par notre algorithme, les pixels **oranges** le sont.

Scénario 1a	Non détecté	Détecté
Absence	100 %	0 %
Présence	29.7 %	70.3 %

Scénario 1b	Non détecté	Détecté
Absence	95.5 %	4.5 %
Présence	20.5 %	79.5 %

Scénario 2a	Non détecté	Détecté
Absence	83.6 %	16.4 %
Présence	0 %	100 %

Scénario 2b	Non détecté	Détecté
Absence	100 %	0 %
Présence	37.2 %	62.8 %

TABLE 4.3: Matrices de confusion pour la détection des gaz des scènes synthétiques dans la bande LWIR.

Par ailleurs, on remarque que pour certains scénarii, il existe des structures de pixels détectés par le SMF ; bien qu'il y ait des pixels dans leur voisinage non détectés ayant des concentrations intégrées plus importantes. Ces structures de pixels ont un sol constitué de matériaux peu émissifs comme l'aluminium et le cuivre. La figure 4.6 met en évidence l'apparition de ces structures pour deux scénarii (1b et 2b) en bande MWIR. Ce type de structures est aussi observé, dans une moindre mesure, pour les scénarii de la bande LWIR.



FIGURE 4.6 – Illustration de l'impact de la composition du sol sur la détection des panaches de gaz. (a) Scénario 1b pour la bande MWIR. (b) Scénario 2b pour la bande MWIR. Les panaches de gaz couvrant des structures de matériaux émissifs sont plus facilement détectables.

4.3.3 Étude de la classification de la scène

Les deux classifications sous et hors panache, nous permettent de regrouper les pixels ayant les mêmes caractéristiques (propriétés de surface) dans les mêmes classes. L'estimation de la luminance de fond des pixels sous le panache est obtenue alors grâce à une mise en correspondance entre les différentes classes issues des deux classifications. En conséquence, la performance de cette estimation est très dépendante de la qualité de nos deux classifications.

Pour valider notre méthode de classification, nous l'avons appliquée sur les scènes de raffinerie et de cimenterie (scénarii : 1a, 1b, 2a et 2b), à la fois dans les bandes MWIR et LWIR. Les cartes de répartitions des matériaux des deux scènes (cf. figure 4.7) représentent la vérité terrain de nos classifications.

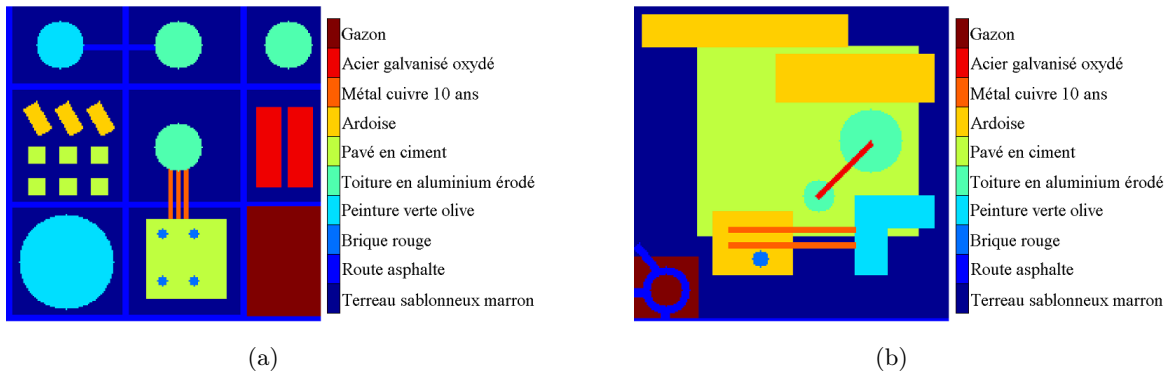


FIGURE 4.7 – Répartition spatiale des matériaux constituant le sol de la scène de (a) la raffinerie, et celle de (b) la cimenterie.

Les classifications ont été effectuées à partir des images en luminance des différentes scènes. Les

bandes d'absorption des gaz présents dans le panache ont été éliminées afin de réduire l'impact de la présence de ces gaz sur la classification.

Le seuil D_{max} , définissant la distance maximale d'un pixel au centroïde de sa classe, est choisi pour chacune des classifications. La valeur choisie doit permettre de classer au mieux les pixels dans leurs vraies classes, en évitant de couper une classe en différentes sous-classes.

Sur les figures 4.8, 4.9, 4.10 et 4.11 nous avons illustré l'ensemble des résultats de nos classifications. Les figures 4.8 et 4.9 représentent respectivement les classifications de la raffinerie et de la cimenterie en bande MWIR ; tandis que les figures 4.10 et 4.11 correspondent aux résultats des classifications de ces mêmes scènes en bande LWIR.

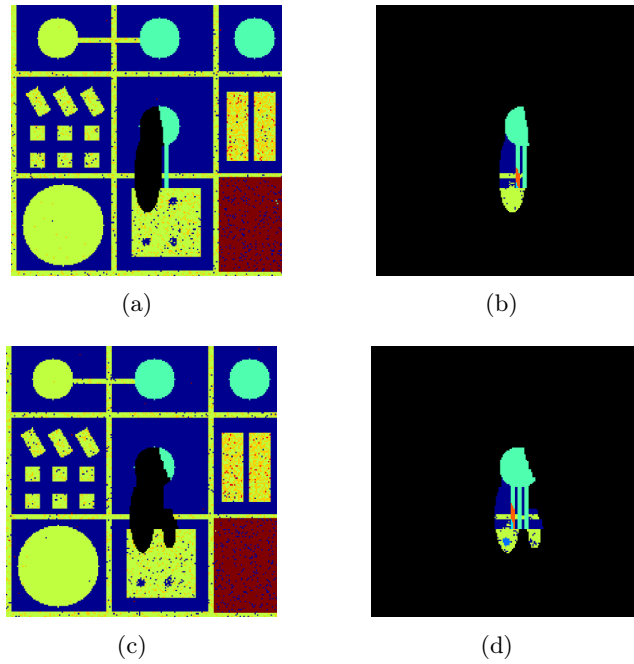


FIGURE 4.8 – Cartes des classifications réalisées sur l'image de la raffinerie en bande MWIR. (a) Classification obtenue hors panache (scénario 1a). (b) Classification obtenue sous le panache (scénario 1a). (c) Classification obtenue hors panache (scénario 1b). (d) Classification obtenue sous le panache (scénario 1b).

Ces figures montrent que les résultats des classifications sont assez hétérogènes d'un scénario à un autre, et d'une bande spectrale à une autre. Les pixels de la raffinerie sont mieux classés que ceux de la cimenterie, aussi bien en bande MWIR qu'en bande LWIR.

On remarque aussi qu'il est difficile de séparer certains matériaux les uns des autres. À titre d'exemple, on peut voir sur la figure 4.8-(a) que l'*ardoise*, le *pavé en ciment* et la *peinture verte olive* sont classés dans la même classe. Par ailleurs, pour certains matériaux, même lorsqu'ils sont classés dans différentes classes, on retrouve une forte confusion inter-classes. Ainsi, sur la carte de classification de la figure 4.11-(a), plusieurs pixels avec un sol en *Terreau sablonneux marron* (couleur

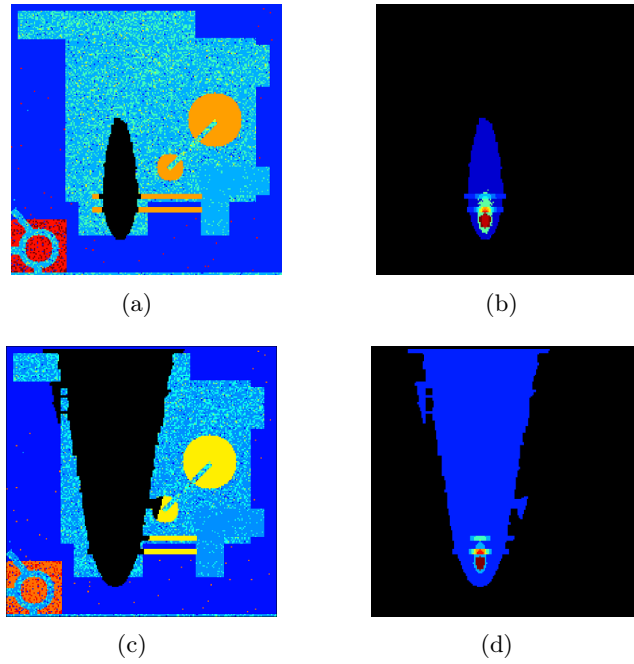


FIGURE 4.9 – Cartes des classifications réalisées sur l'image de la cimenterie en bande MWIR. (a) Classification obtenue hors panache (scénario 2a). (b) Classification obtenue sous le panache (scénario 2a). (c) Classification obtenue hors panache (scénario 2b). (d) Classification obtenue sous le panache (scénario 2b).

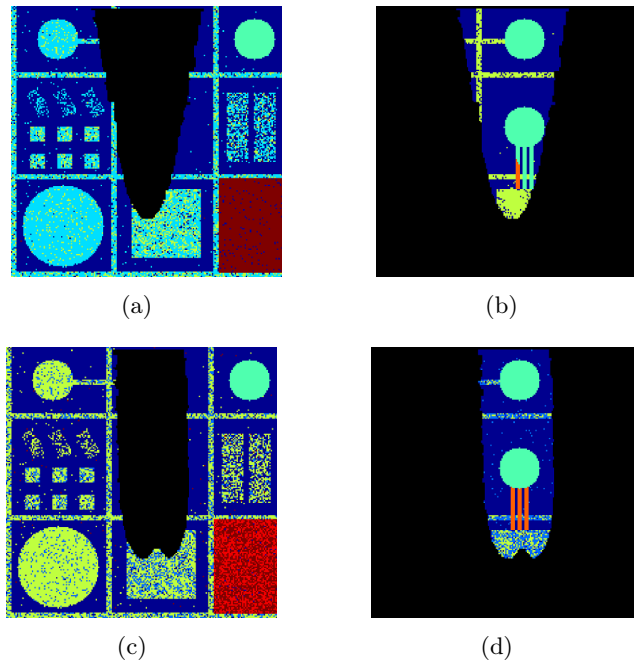


FIGURE 4.10 – Cartes des classifications réalisées sur l'image de la raffinerie en bande LWIR. (a) Classification obtenue hors panache (scénario 1a). (b) Classification obtenue sous le panache (scénario 1a). (c) Classification obtenue hors panache (scénario 1b). (d) Classification obtenue sous le panache (scénario 1b).

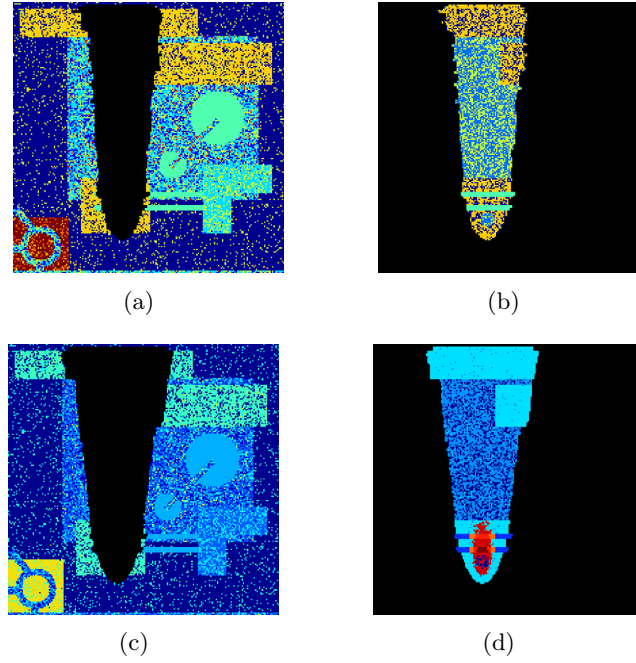


FIGURE 4.11 – Cartes des classifications réalisées sur l’image de la cimenterie en bande LWIR. (a) Classification obtenue hors panache (scénario 2a). (b) Classification obtenue sous le panache (scénario 2a). (c) Classification obtenue hors panache (scénario 2b). (d) Classification obtenue sous le panache (scénario 2b).

bleue) sont classés avec les pixels ayant un sol en *ardoise* (couleur jaune) et vice-versa.

Pour le scénario 2b de la cimenterie (cf. figures 4.9-(d) et 4.11-(d)), on remarque que la classification porte essentiellement sur la composition du panache et non pas sur celle du sol. En effet, bien que les bandes d’émissions des gaz présents dans le panache aient été éliminés avant la réalisation de la PCA ; la température du panache excessivement élevée pour ce scénario (catastrophe industrielle) accroît l’impact des gaz atmosphériques (en particulier la vapeur d’eau) dans le signal total, pour les pixels concernés. Ainsi, deux pixels du même matériau auront des luminances très différentes selon leur position par rapport à la source du panache. Dans notre classification nous avons choisi un seuil D_{max} suffisamment grand pour limiter le nombre des classes. C’est la raison pour laquelle deux pixels de matériaux différents loin de la source, seront classés dans la même classe.

Afin de comprendre les limitations de nos classifications, nous avons représenté l’ensemble des pixels de chaque scène dans l’espace des classifieurs (attributs) utilisés.

Comme on peut le voir sur les images 4.12 et 4.13, chaque pixel est désigné par un point dans l’espace des trois premières composantes obtenues après une PCA sur l’image de la scène. La figure 4.12 correspond au scénario 1b de la raffinerie en bande LWIR, tandis que la figure 4.13 correspond au scénario 2b de la cimenterie en bande MWIR. Les représentations des autres scènes synthétiques

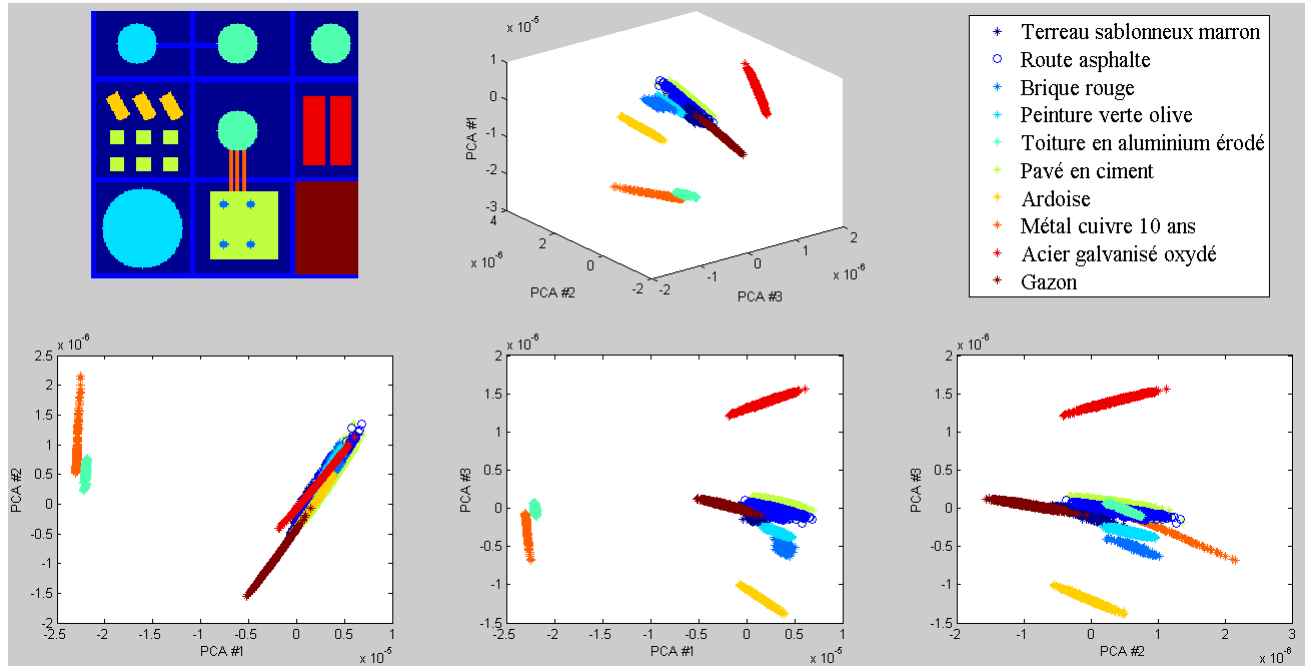


FIGURE 4.12 – Représentation des classes de l'image du scénario 1b en bande LWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

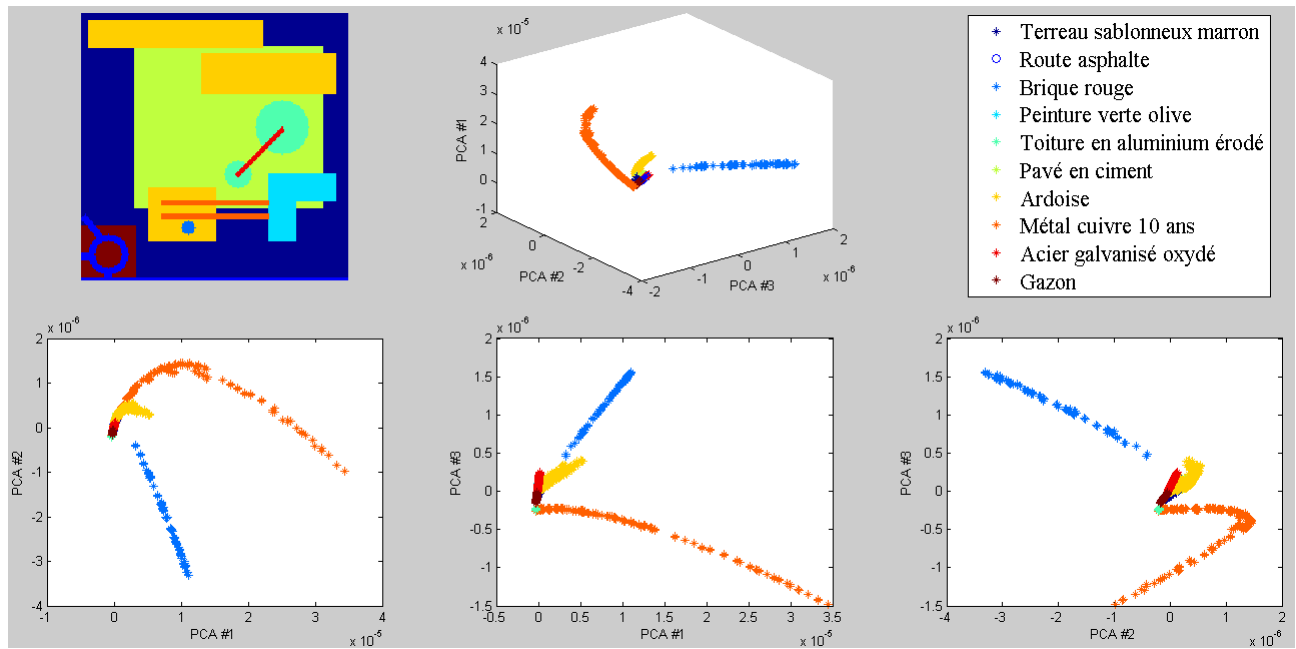


FIGURE 4.13 – Représentation des classes de l'image du scénario 2b en bande MWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

ont été incluses dans l'Annexe 5.5. Notre choix a été de représenter ici les deux cas extrêmes, en terme de performance de la classification.

Sur la scène de la raffinerie (figure 4.12), on observe que les matériaux suivants : *Métal cuivre 10 ans*, *Toiture en aluminium érodé*, *Ardoise* et *Acier galvanisé oxydé*, se distinguent aisément des autres matériaux de la scène. En revanche, en se basant uniquement sur les attributs choisis, il est assez difficile de séparer les autres matériaux en ayant une confusion inter-classe nulle. Sur les figures correspondantes à cette scène (4.10-(c) et 4.10-(c)), on constate bien que les matériaux *Métal cuivre 10 ans* et *Toiture en aluminium érodé* sont bien classés. Par contre pour les autres matériaux il y a une confusion inter-classes non nulle.

Sur la scène de la cimenterie (scénario 2b), où les concentrations et température des gaz sont très importantes, on observe un grand étalement de la distribution des matériaux sous le panache et proches de la source (*Métal cuivre 10 ans*, *Brique rouge* et *Pavé en ciment*). La classification dans ce cas devient très délicate. Si on choisit un seuil D_{max} suffisamment petit, nous pouvons alors séparer les différents matériaux. Seulement, les trois matériaux sous le panache seront scindés en un grand nombre de classes. Par contre, si le D_{max} n'est pas suffisamment petit ; on observe une fusion entre les matériaux éloignés de la source (cf. figure 4.9-(d)).

Après cette analyse qualitative des classifications, il est important de procéder à une approche quantitative pour la validation de celles-ci. L'outil de base pour l'évaluation de la qualité d'une classification est la matrice de confusion (MC). Il s'agit d'un tableau obtenu en confrontant les données classées avec les données de référence (vérité terrain) : le terme $MC(i, j)$ de cette matrice correspond au nombre de pixels associés à la classe j de la carte de classification appartenant à la classe du matériau i . La matrice de confusion est adaptée pour les classifications supervisées, où le nombre de classes obtenues est égal au nombre de classes de référence : MC est alors une matrice carrée. Les termes diagonaux correspondent aux pixels bien classés, alors que les autres représentent les confusions inter-classes.

Dans notre cas, le nombre de classes obtenues est complètement indépendant du nombre des matériaux présents dans la scène. Nos matrices de confusion ne sont pas systématiquement carrées. Un exemple de matrice de confusion est donné ci-dessous (cf. tableau 4.4). Nous y avons représenté la matrice de confusion obtenue pour la classification (cf. figure 4.8-(d)) en bande MWIR, de la zone du panache de la scène synthétique de raffinerie (scénario 1b). Les autres matrices de confusion sont données en annexe 5.5.

À partir des matrices de confusion, deux familles d'indices sont définies : **Indices Cartographiques de Validation (ICV)** et **Indices de Pureté de Classes (IPC)**. L'ICV, calculé pour chaque matériau Mat_i de la scène, est le pourcentage maximal de pixels de ce matériau associés à

Matériau	Classes de la zone du panache						ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	
Terreau sablonneux marron	520	0	0	0	10	0	98.11
Route asphalte	12	0	0	0	82	0	87.23
Brique rouge	13	0	26	0	19	0	44.83
Toiture en aluminium érodé	0	0	0	556	0	0	100
Pavé en ciment	19	0	0	0	261	0	93.21
Métal cuivre 10 ans	0	12	0	229	0	39	81.79
IPC (%)	92.20	100	100	70.83	70.16	100	

TABLE 4.4: Matrice de confusion de la classification, dans la zone du panache, de la scène synthétique de raffinerie (scénario 1b) dans la bande MWIR.

une classe Cl_j de la carte de classification par rapport au nombre total des pixels du matériau Mat_i . Ce qui s'écrit mathématiquement :

$$ICV(Mat_i) = \max_j \left(\frac{MC(i, j)}{Card(Mat_i)} \right) \quad (\%) \quad (4.20)$$

Par ailleurs, l'indice IPC est défini pour une classe Cl_j de la carte de classification, comme le pourcentage des pixels du matériau majoritaire représenté dans cette classe. On le calcule grâce à la formule suivante :

$$ICV(Cl_j) = \max_i \left(\frac{MC(i, j)}{Card(Cl_j)} \right) \quad (\%) \quad (4.21)$$

L'obtention d'un ICV de 100 %, pour un matériau donné, signifie que tous les pixels de ce matériau ont été regroupés dans la même classe. De façon similaire, une classe ayant un IPC de 100 % est une classe « pure » : elle ne contient que des pixels du même matériau.

Les tableaux 4.5 et 4.7 représentent les valeurs des indices ICV pour toutes les classifications, respectivement en bandes MWIR et LWIR. En outre, les valeurs des indices IPC des différentes classifications ont été regroupées dans le tableau 4.6 (bande MWIR) et 4.8 (bande LWIR).

Sur l'ensemble des classifications, on constate que les sols en cuivre (*Métal cuivre 10 ans*), et en aluminium (*Toiture en aluminium érodé*) ont un ICV de 100 %, sauf dans la zone du panache de certains scénarii. Ce qui s'explique par le fait que ces deux matériaux ont une dispersion plus petite que les seuils D_{max} sélectionnés. En présence de panache cette dispersion devient plus importante. En effet, en fonction de leur distribution par rapport à la source d'émission, les pixels concernés verront leur signal modifié différemment. Pour certains scénarii, la dispersion devient plus importante que D_{max} , les pixels seront alors classés dans différentes classes.

On constate que pour certains matériaux, notamment l'*Acier galvanisé oxydé*, les ICV sont relativement faibles (35 – 53 %). Ce qui peut s'expliquer par une dispersion très grande des pixels de ce

matériau dans l'espace des classifieurs. Ils sont alors séparés en différentes classes.

En analysant les indices de pureté des classes, on s'aperçoit que la plupart des classes obtenues ont un IPC supérieur à 80 %. Néanmoins, pour quelques classes l'IPC est assez faible (34–61 %). Les classes en question contiennent des pixels de plusieurs matériaux « proches » tels que : la *Peinture verte olive*, *Route asphalte*, *Ardoise* et *Pavé en ciment*.

Matériau	Zone hors panache			
	Scénario 1a	Scénario 1b	Scénario 2a	Scénario 2b
Gazon	90.64	90.88	74.25	73.07
Terreau sablonneux marron	99.98	99.94	99.73	99.68
Peinture verte olive	99.55	99.72	94.57	93.09
Route asphalte	83.37	84.52	70.59	68.37
Brique rouge	83.91	86.21		
Pavé en ciment	83.50	85.16	68.13	66.61
Ardoise	82.92	80.10	61.96	59.82
Acier galvanisé oxydé	50.80	52.45	44.32	42.05
Métal cuivre 10 ans	100		100	100
Toiture en aluminium érodé	100	100	100	100

Matériau	Zone du panache			
	Scénario 1a	Scénario 1b	Scénario 2a	Scénario 2b
Terreau sablonneux marron	97.26	98.11	91.67	100
Route asphalte	92.86	87.23		
Brique rouge	100	44.83	51.85	72.84
Pavé en ciment	95.96	93.21	100	100
Ardoise			82.42	98.26
Métal cuivre 10 ans	78.49	81.79	44.40	63.53
Toiture en aluminium érodé	100	100		100

TABLE 4.5: Indice Cartographique de Validation (ICV), exprimé en (%), pour l'ensemble des classifications en bande MWIR.

Un dernier outil que nous avons employé pour évaluer la performance de nos classifications est le coefficient kappa κ (cf. [87] et [88]). Il s'agit d'un indice permettant d'évaluer la matrice de confusion par rapport à une matrice de confusion dont les valeurs sont aléatoires. La formule suivante permet de calculer ce coefficient ([88]) :

$$\kappa = \frac{N_C \cdot \sum_{i=0}^{N_C} MC(i, i) - \sum_{i=0}^{N_C} \left[\sum_{j=0}^{N_C} MC(i, j) \right] \cdot \left[\sum_{j=0}^{N_C} MC(j, i) \right]}{N_C^2 - \sum_{i=0}^{N_C} \left[\sum_{j=0}^{N_C} MC(i, j) \right] \cdot \left[\sum_{j=0}^{N_C} MC(j, i) \right]} \quad (4.22)$$

Où : MC est notre matrice de confusion. N_C est le nombre de classe. Dans les cas où le nombre de classe est différent du nombre de matériaux de la scène, on complète artificiellement la matrice de confusion par des lignes ou colonnes nulles.

Zone hors panache								
Classes	1	2	3	4	5	6	7	8
Scénario 1a	99.87	96.67	34.45	100	39.96	94.73		
Scénario 1b	99.60	96.75	34.54	100	41.58	98.41		
Scénario 2a	95.34	97.07	50.05	49.08	48.88	100	77.83	
Scénario 2b	94.60	98.17	75.00	100	41.94	43.76	42.58	82.25

Zone du panache								
Classes	1	2	3	4	5	6	7	8 - 13
Scénario 1a	96.77	100	69.93	100	73.26			
Scénario 1b	92.20	100	100	70.83	70.16	100		
Scénario 2a	60.13	93.16	98.10	100	91.18	100	100	100
Scénario 2b	100	100	55.57	49.61	100	100	100	

TABLE 4.6: Indice de Pureté des Classes (IPC), exprimé en (%), pour l'ensemble des classifications en bande MWIR.

Zone hors panache				
Matériau	Scénario 1a	Scénario 1b	Scénario 2a	Scénario 2b
Gazon	95.71	51.25	75.61	75.25
Terreau sablonneux marron	99.19	98.91	91.89	90.77
Peinture verte olive	89.66	88.13	64.91	64.74
Route asphalte	64.35	62.77	43.95	43.10
Brique rouge	58.62	56.90		
Pavé en ciment	60.71	59.29	44.53	44.20
Ardoise	63.02	62.35	67.99	65.96
Acier galvanisé oxydé	44.98	44.36	36.36	35.80
Métal cuivre 10 ans		100	100	
Toiture en aluminium érodé	100	100	100	100

Zone du panache				
Matériau	Scénario 1a	Scénario 1b	Scénario 2a	Scénario 2b
Terreau sablonneux marron	99.83	98.53	83.11	96.53
Route asphalte	82.70	59.86		
Brique rouge	100	63.79	70.37	56.79
Pavé en ciment	89.02	51	54.36	61.70
Ardoise			61.60	90.33
Métal cuivre 10 ans	78.57	100	100	52.80
Toiture en aluminium érodé	100	100		

TABLE 4.7: Indice Cartographique de Validation (ICV), exprimé en (%), pour l'ensemble des classifications en bande LWIR.

Classes	Zone hors panache								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Scénario 1a	99.46	89.24	37.11	40.33	100				
Scénario 1b	95.47	89.99	37.02	43.45	100	100	51.16		
Scénario 2a	94.67	91.94	86.19	40.82	64.85	90.26	87.27	100	80.31
Scénario 2b	95.18	92.52	38.39	84.69	62.04	80.20	89.08	100	81.75

Classes	Zone du panache							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Scénario 1a	96.73	59.82	100	86.57				
Scénario 1b	98.55	100	49.40	74.36	61.45	100		
Scénario 2a	96.88	98.58	95.32	85.33	100			
Scénario 2b	97.09	100	97.34	88.87	100	88.46	100	100

TABLE 4.8: Indice de Pureté des Classes (IPC), exprimé en (%), pour l'ensemble des classifications en bande LWIR.

Dans le cas d'une classification idéale le coefficient κ est égal à 1. Si ce dernier est compris entre $[0.81 - 1]$, la classification est excellente. Cette dernière est bonne pour un κ dans l'intervalle $[0.61 - 0.80]$, et modérée si ce coefficient est dans l'intervalle $[0.41 - 0.60]$. Enfin, la classification est mauvaise pour un coefficient κ compris entre $[0.21 - 0.40]$, et très mauvaise si ce dernier descend en dessous de la valeur de 0.21.

Dans le tableau suivant (4.9) nous avons représenté les valeurs du coefficient κ , pour l'ensemble des classifications réalisées dans notre étude. Ce tableau montre que hormis les deux classifications des panaches de la cimenterie en MWIR, nos classifications restent acceptables, voire excellentes pour les panaches de la raffinerie en bande LWIR.

	MWIR		LWIR	
	Hors panache	Panache	Hors panache	Panache
Scénario 1a	0.64	0.73	0.61	0.81
Scénario 1b	0.63	0.70	0.55	0.84
Scénario 2a	0.59	0.35	0.61	0.41
Scénario 2b	0.62	0.06	0.59	0.55

TABLE 4.9: Coefficient κ calculé pour l'ensemble des classifications étudiées.

4.3.4 Performances de l'estimation de la luminance de fond

Après avoir réalisé les classifications de la scène sous et hors panache, nous estimons la luminance de fond L_{off} des pixels sous le panache en mettant en correspondance les différentes classes issues

des deux classifications. Dans la suite de cette partie nous commencerons par présenter les résultats que nous avons obtenus avec cette première méthode d'estimation de L_{off} . Cette première méthode sera désignée par *Clustering-Based estimation method* ou simplement par la méthode CB.

Afin de compléter notre analyse de la méthode CB, nous avons appliqué la méthode Selected-Band introduite par *Niu et al.* [25] pour estimer la luminance de fond de nos scènes synthétiques.

La confrontation des résultats obtenues par ces deux approches, nous a permis de mettre en place une nouvelle méthode d'estimation de L_{off} . La présentation de cette nouvelle méthode et de ces résultats fera donc l'objet du deuxième paragraphe de cette partie.

Enfin, quelques perspectives d'amélioration sont discutées dans le dernier paragraphe.

Présentation des résultats

Pour présenter les résultats obtenus, nous les avons exprimés en termes de températures de brillance. Pour chacune de nos scènes, nous avons calculé la différence entre les températures de brillance de fond des pixels sous le panache et leurs estimées. Dans les figures 4.14, 4.15, 4.16 et 4.17, nous avons représenté cette différence de températures de brillance pour nos différentes scènes synthétiques. Pour chaque matériau présent sous le panache, la courbe moyenne de différence des températures de brillance est représentée avec l'écart-type, en fonction du nombre d'onde.

En analysant les figures 4.14, 4.15, 4.16 et 4.17, on constate que la performance de l'estimation de la luminance de fond par notre méthode est très dépendante de la performance de la classification. Les scènes qui ont été bien classifiées, présentent des résultats convenables pour l'estimation de la luminance de fond. Ainsi, pour les scénarii (1a et 1b) de la raffinerie en LWIR, pour la plupart des matériaux la luminance de fond a été retrouvée à moins de 2 K d'erreur en température de brillance. Ce qui représente un bon résultat, compte tenu de la variabilité intra-classes des températures du sol (cf. le tableau 2.1). Pour ces deux scènes, le cuivre est le seul matériau pour lequel l'estimation de L_{off} présente une erreur allant jusqu'à 7.5 K . Ceci est dû au fait que les pixels concernés ont été réunis avec la classe d'aluminium. En effet, ces deux matériaux sont proches spectralement comme nous pouvons le constater sur les figures de l'annexe 5.5.

Pour les deux scénarii de la cimenterie dans la bande LWIR, les résultats comportent plus d'erreurs d'estimation. Pour le scénario 2b, l'erreur atteint même 9 K en température de brillance, pour certains pixels et pour certains nombres d'onde. Il s'agit de cas de pixels mal classés, où on leur associe une luminance de fond correspondant à un autre matériau.

En bande MWIR, les erreurs commises par notre méthode d'estimation de L_{off} sont très grandes et peuvent dépasser 20 K pour certains matériaux, comme nous pouvons le constater sur les figures 4.16 et 4.17. Ce qui s'explique par une mauvaise classification de la scène dans cette bande. Cette conclusion est confirmée par la figure 4.18, où nous avons tracé en bande MWIR les moyennes des

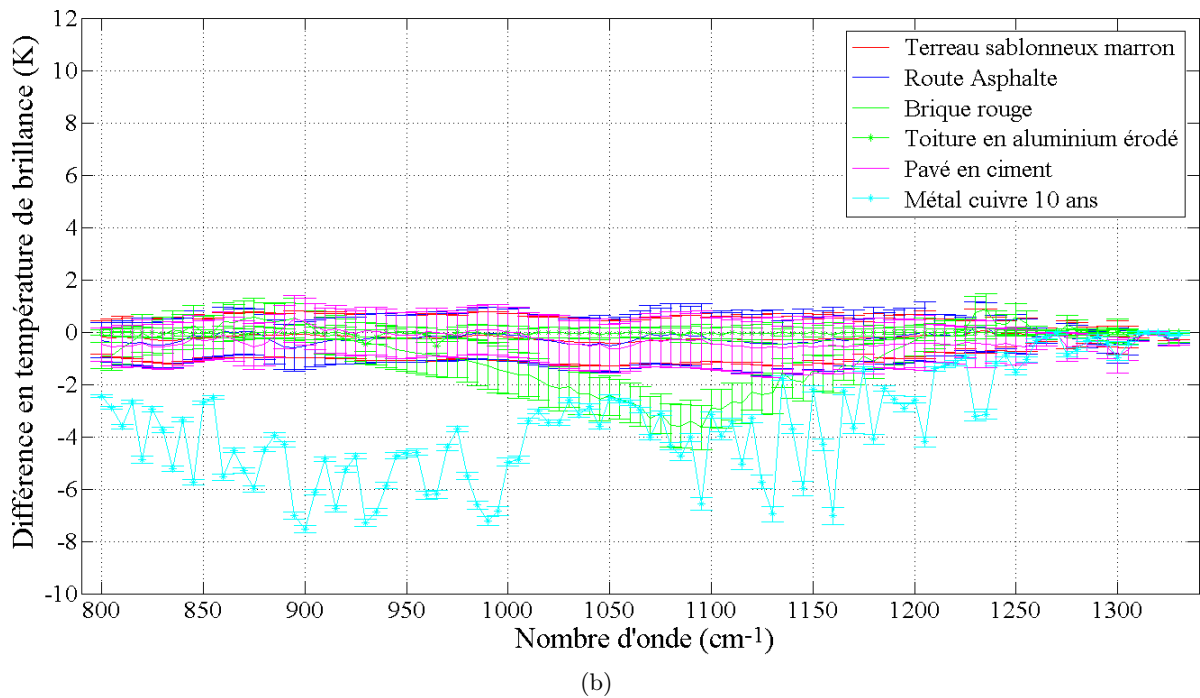
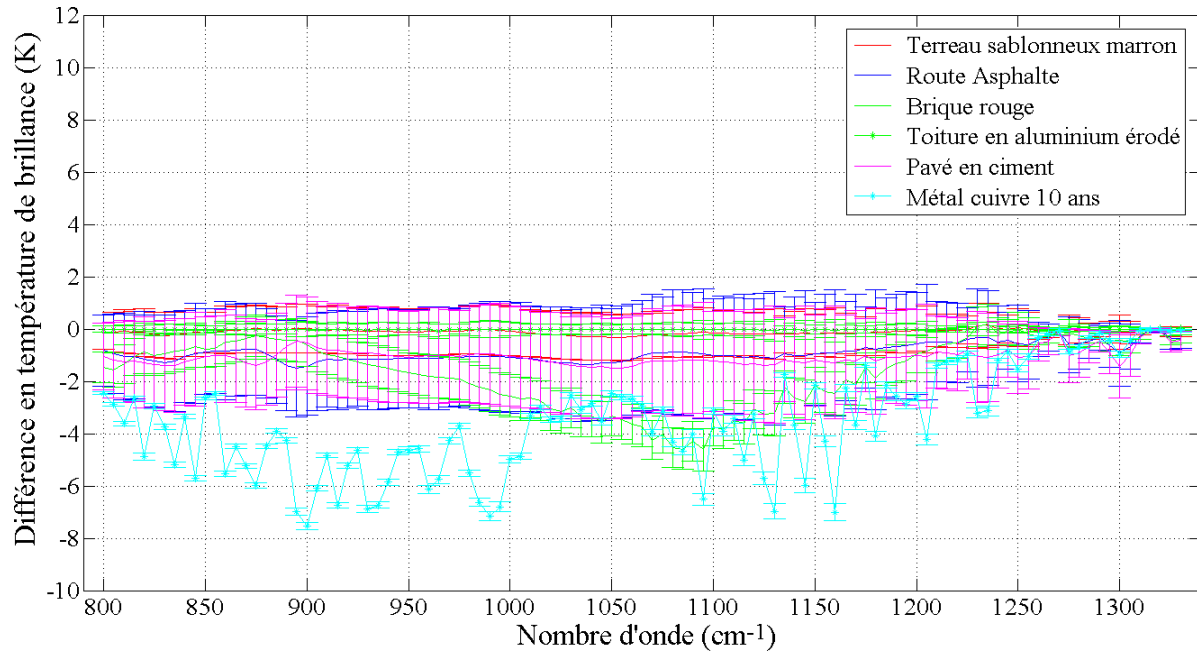
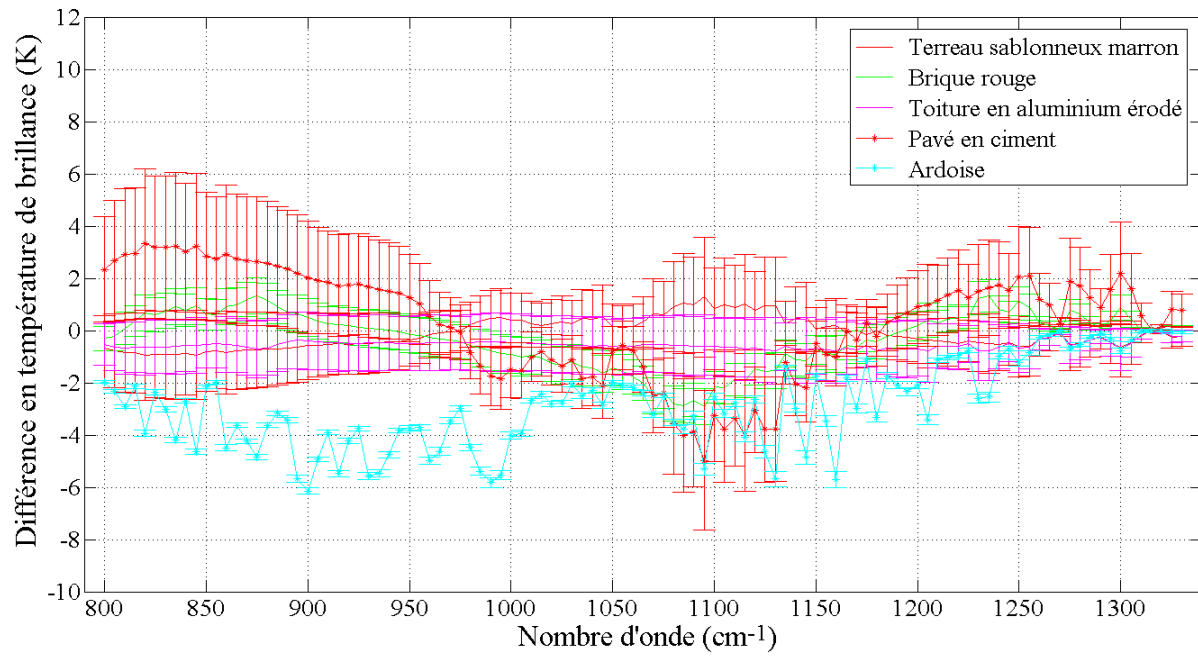
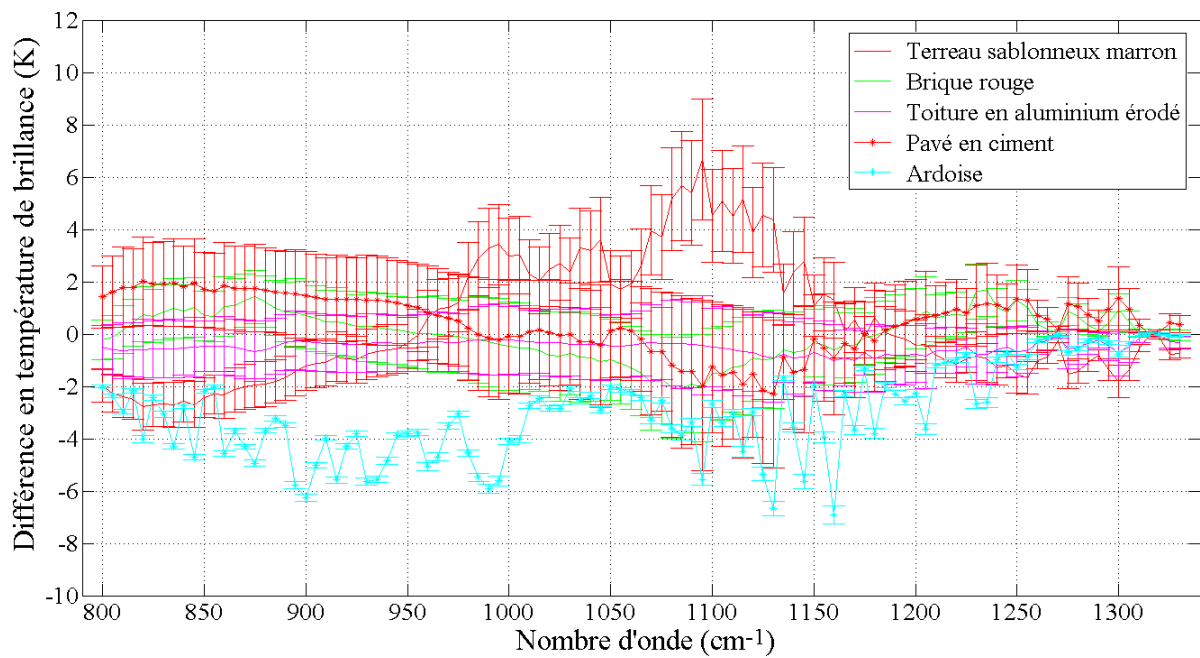


FIGURE 4.14 – Résultats de l'estimation de la luminance de fond pour la scène de raffinerie en bande LWIR : (a) scénario 1a, (b) scénario 1b.

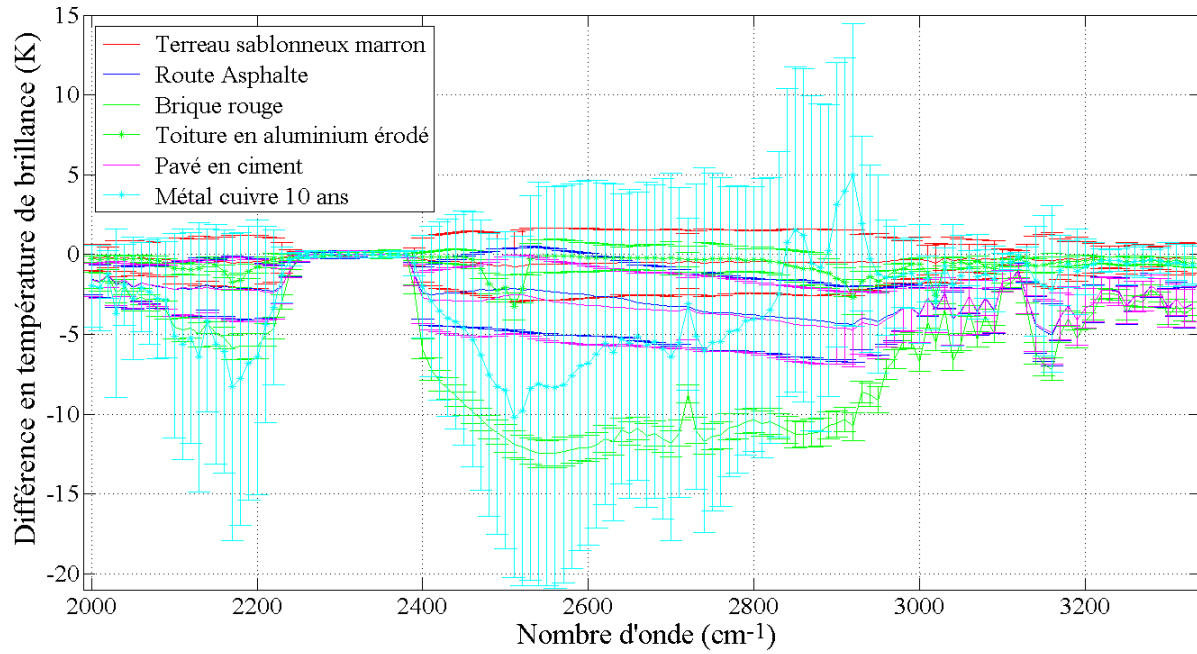


(a)

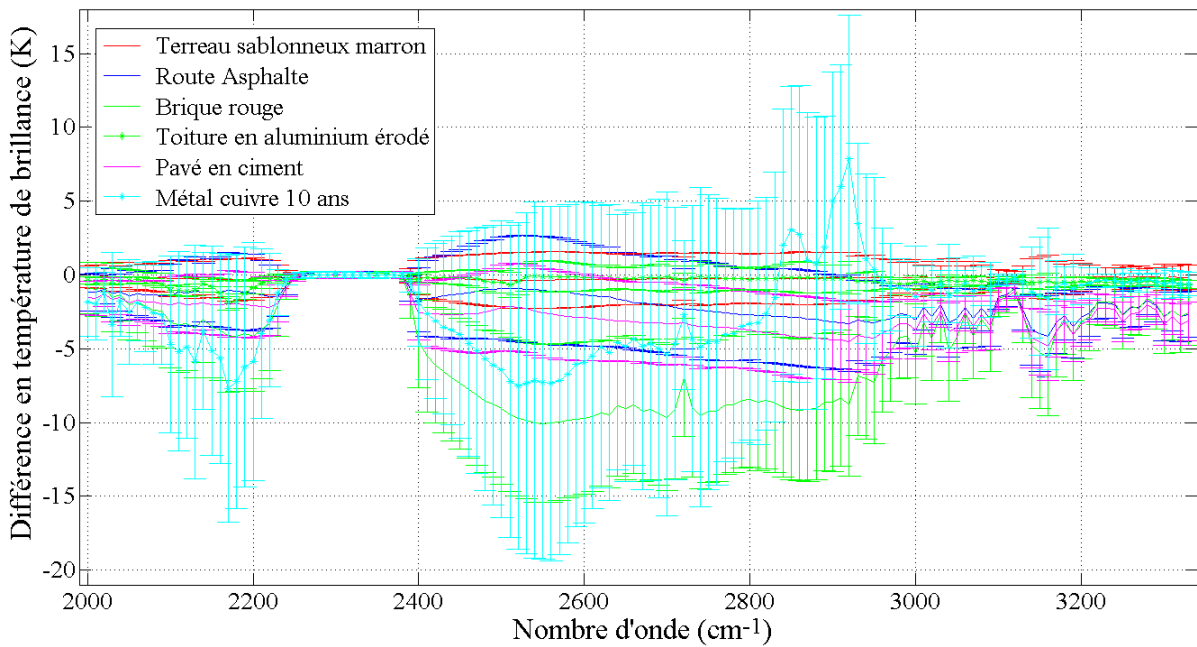


(b)

FIGURE 4.15 – Résultats de l'estimation de la luminance de fond pour la scène de raffinerie en bande LWIR : (a) scénario 2a, (b) scénario 2b.

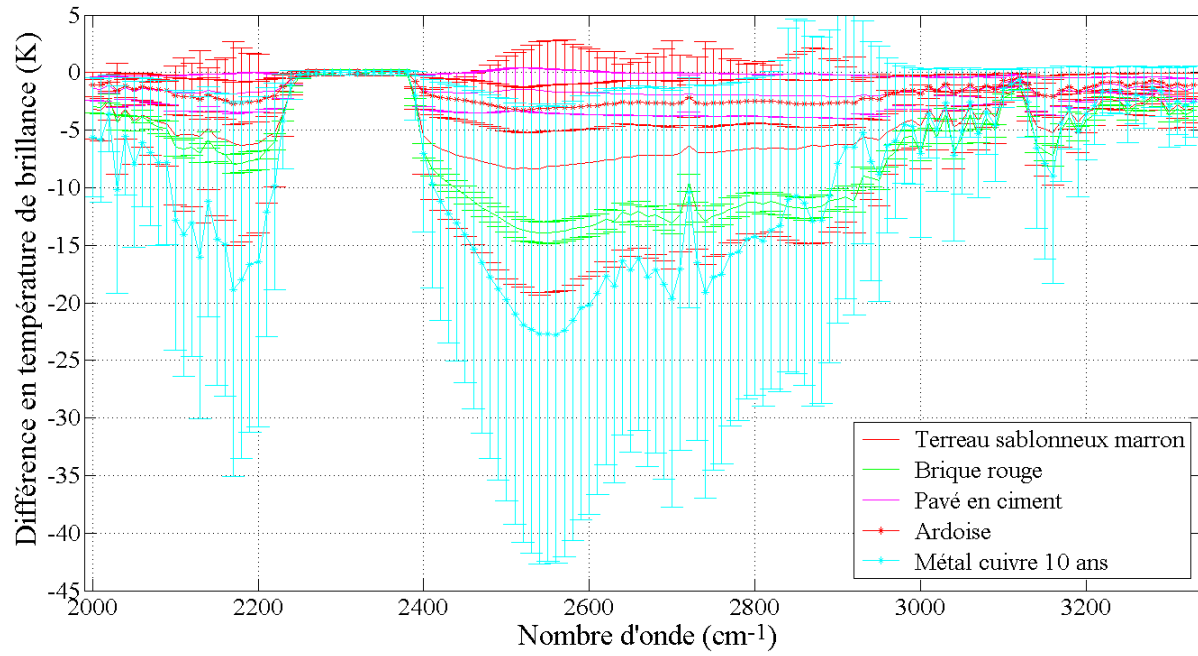


(a)

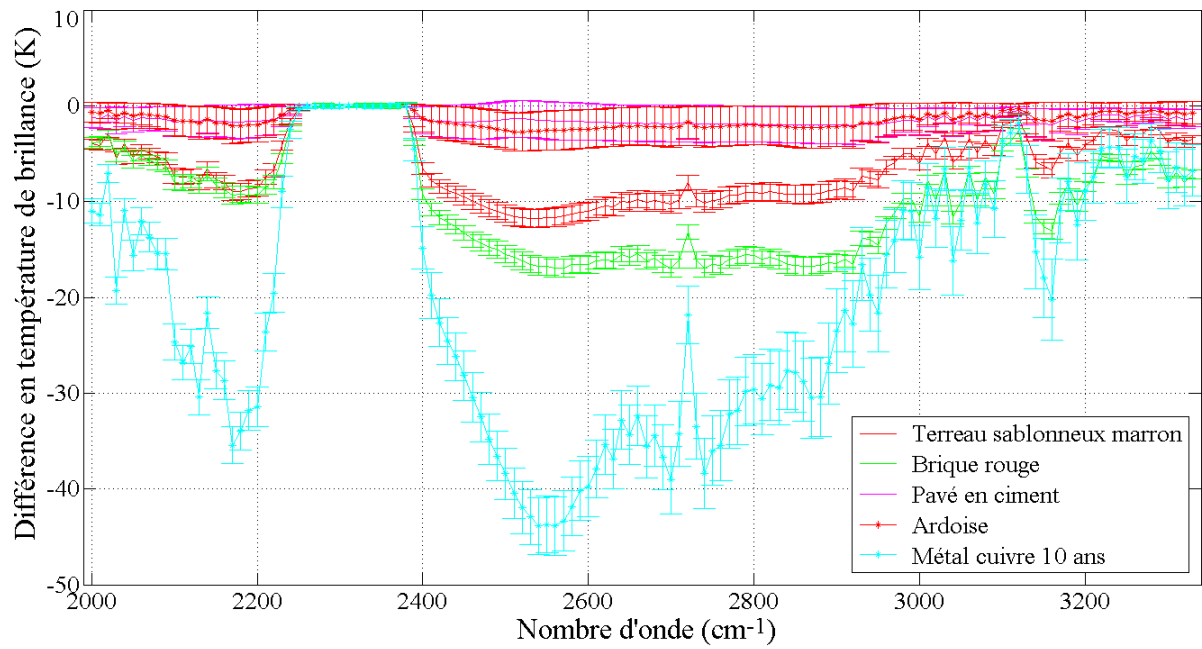


(b)

FIGURE 4.16 – Résultats de l'estimation de la luminance de fond pour la scène de raffinerie en bande MWIR : (a) scénario 1a, (b) scénario 1b.



(a)



(b)

FIGURE 4.17 – Résultats de l'estimation de la luminance de fond pour la scène de cimenterie en bande MWIR : (a) scénario 2a, (b) scénario 2b.

vraies luminances de fond pour les matériaux sous le panache 2b de la scène de cimenterie.

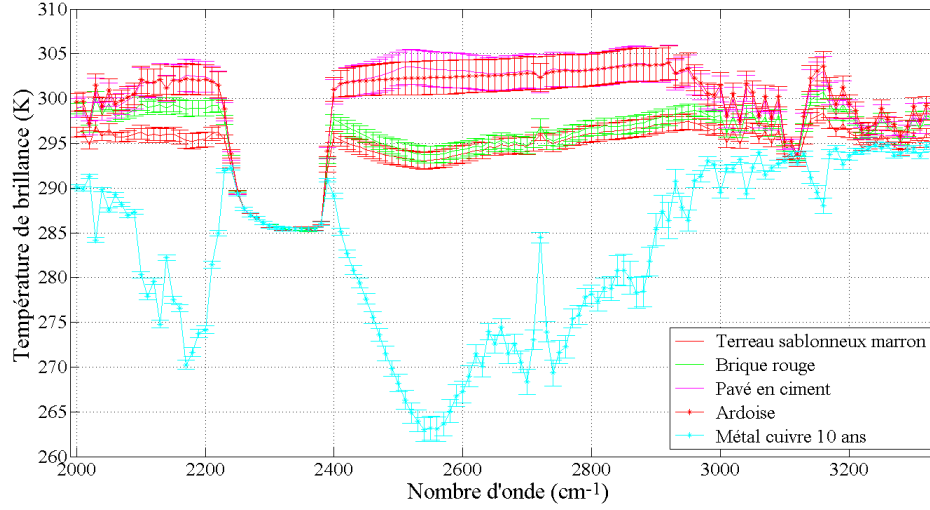


FIGURE 4.18 – Luminances de fond moyennées dans la bande MWIR, pour les différents matériaux du panache 2b de la cimenterie.

Il en sort de cette figure que la différence entre le spectre moyen du cuivre et celui du pavé de ciment est très proche des courbes de l'erreur d'estimation pour le cuivre dans la figure 4.17. Lors des classifications des scènes de la cimenterie, la majorité des pixels du cuivre ont été classifiés dans une classe où le pavé de ciment est le matériau majoritaire. Ainsi, la luminance de fond pour ces pixels de cuivre a été estimée en utilisant la luminance de fond du pavé de ciment.

La méthode proposée par *Niu et al.* pour l'estimation de L_{off} a été appliquée sur nos images synthétiques. Pour chaque scène, la PCA a été calculée en utilisant les pixels de la zone hors panache. Lorsque la scène est très hétérogène comme le sont nos scènes synthétiques, l'estimation de L_{off} donne de très bons résultats pour le matériau majoritaire (Terreau sablonneux marron sur la figure 4.19). Mais pour les matériaux minoritaires, l'estimation sera d'autant plus détériorée que le spectre du matériau en question est différent de celui du matériau principal. En effet, lors du calcul de la PCA, les premiers vecteurs principaux modélisent essentiellement le spectre du matériau majoritaire (information la plus importante).

En revanche, dès qu'on a affaire à une scène homogène, la méthode de *Niu et al.* donne une très bonne estimation de la luminance de fond. Elle permet de prendre en compte les variations intra-classe du matériau de la scène. Ce que ne fait pas notre méthode qui utilise des spectres moyennés sur des zones homogènes.

Sur la figure 4.20, nous avons illustré l'application de la méthode de *Niu et al.* sur une image de parking acquise par l'instrument Hyper-Cam-LW de Telops. Lors de cette acquisition un lâcher d'éthylène a été effectué. Le panache résultant a une température inférieure à celle du sol, on l'observe donc en absorption sur l'image 4.20-(a) (zone plus sombre que le reste de l'image). L'éthylène a un

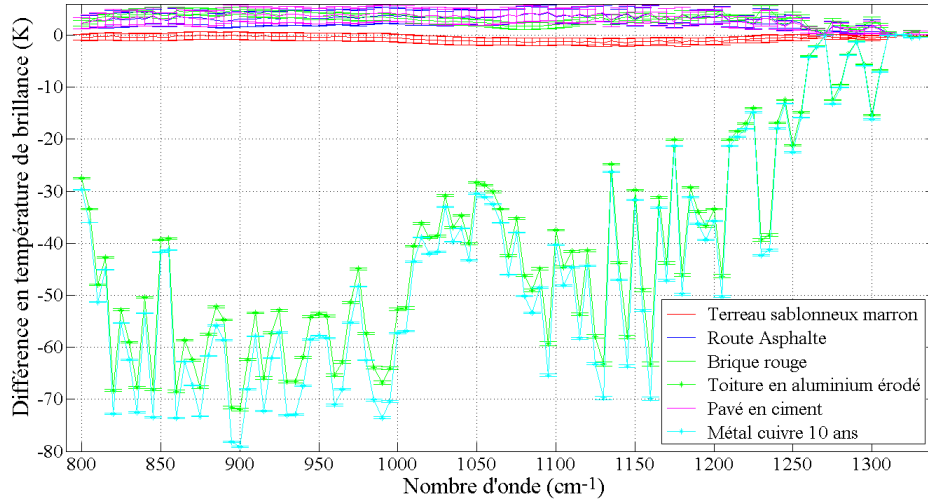


FIGURE 4.19 – Résultats de l'estimation de la luminance de fond par la méthode de *Niu et al.*, pour la scène de raffinerie en bande LWIR, pour le scénario 1a.

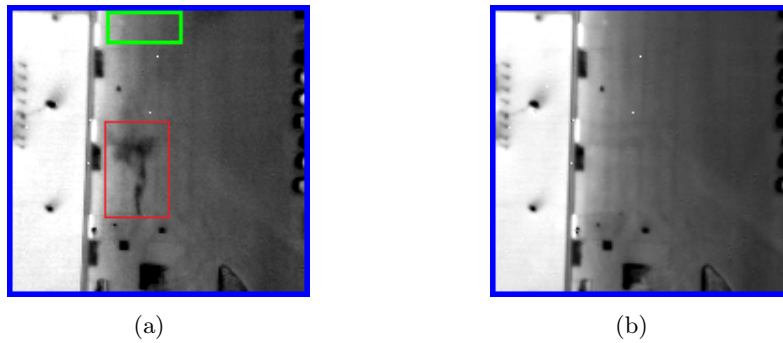


FIGURE 4.20 – Résultats de l'estimation de la luminance de fond par la méthode de *Niu et al.* sur une image acquise par Telops. Cette acquisition du parking de Telops contient un panache d'éthylène. (a) Image de la scène de parking pour la bande d'absorption de l'éthylène (950.4 cm^{-1}), le rectangle vert représente les pixels utilisés pour calculer les vecteurs de la PCA. Tandis que le rectangle rouge illustre la région du panache, où la luminance de fond a été estimée. (b) Luminance de fond estimée par la méthode de *Niu et al.* pour la même bande à 950.4 cm^{-1} .

pic d'absorption autour de la bande spectrale 950.4 cm^{-1} . C'est cette bande qui a été choisie pour illustrer l'estimation de L_{off} , sur la figure 4.20.

Sur l'image 4.20-(b), représentant la bande spectrale 950.4 cm^{-1} de la luminance de fond estimée, on ne constate plus la tâche sombre due au panache.

En outre, en observant bien l'image on constate la présence d'un gradient de couleur selon la direction horizontale. Ce gradient s'explique par un gradient de température selon la direction sud-est nord-ouest (horizontale) : en se levant le soleil a chauffé graduellement les pixels de la scène (acquisition effectuée autour de 11h). La méthode de *Niu et al.* permet de restituer ce gradient de température. On en déduit que cette méthode est très performante pour l'estimation des luminances de fond, lorsqu'il s'agit de scènes homogènes.

Méthode Clustering-based Selected-Band (CSB)

D'après l'analyse que nous venons de présenter, il en ressort que notre méthode d'estimation de L_{off} s'adapte bien aux scènes hétérogènes, à condition d'avoir une bonne classification de la scène. Néanmoins, elle ne permet pas d'avoir une prise en compte des variations intra-classes. En revanche, la méthode introduite par *Niu et al.* donne des résultats très intéressants pour des scènes homogènes. Mais dès qu'il s'agit d'estimer les luminances de matériaux minoritaires d'une scène hétérogène, cette dernière est inefficace.

Afin de tirer le meilleur parti de chacune de ces deux méthodes, nous les avons combinées en une nouvelle méthode que nous avons appelée *Clustering-based Selected-Band Method* [89]. Cette dernière estime les luminances de fond des différents pixels du panache en suivant les étapes suivantes :

1. On réalise deux classifications de la scène sous et hors panache.
2. On met en correspondance les différentes classes issues de ces deux classifications.
3. On applique la méthode d'estimation de *Niu et al.*, pour chacune des classes. La PCA sera calculée sur les pixels des classes hors panache, afin d'estimer les luminances de fond de leur correspondants sous le panache.

Nous avons évalué les performances de cette nouvelle méthode, sur nos données synthétiques, en les comparant avec les performances des deux approches précédentes. Sur la figure 4.21, nous avons représenté les résultats de ces estimations de la luminance de fond sur quatre pixels du scénario 1a de la raffinerie en bande LWIR. La figure 4.21 montre que la méthode CSB donnent de meilleures estimations, à la fois pour les pixels appartenant aux classes « majoritaires » de la scène comme le terreau sablonneux (pixel 1) et l'asphalte (pixel 2), et pour les pixels des classes « minoritaires » tels que l'aluminium (pixel 3) et le cuivre (pixel 4).

Cette figure illustre bien les difficultés de la méthode de *Niu et al.* à restituer les luminances de fond des matériaux « minoritaires ». Ainsi, sur les figures 4.21-(c) et (d), on remarque que l'estimation

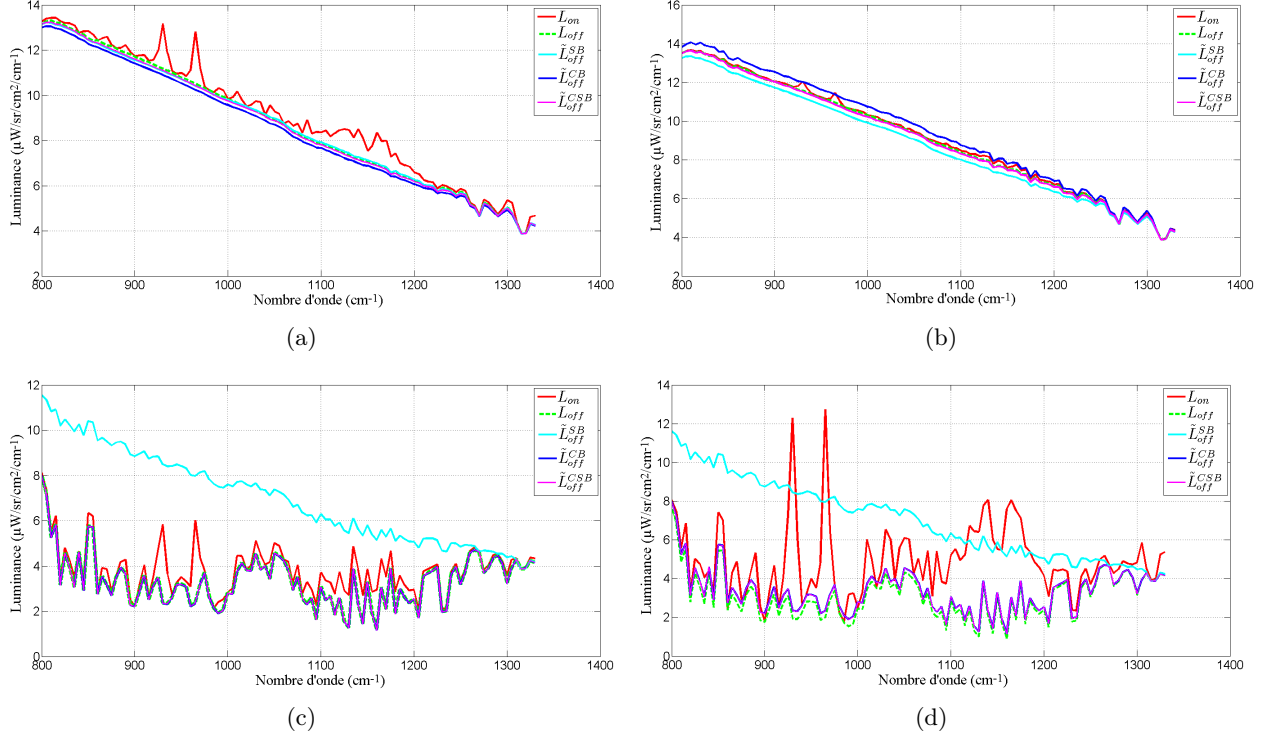


FIGURE 4.21 – Comparaison des trois méthodes d'estimation de L_{off} , sur quatre pixels appartenant à des classes différentes de la scène de raffinerie (scénrio 1a). La courbe rouge correspond à la luminance avec panache, la courbe verte pointillée est celle de la vraie luminance de fond. Les courbes cyan, bleue et magenta représentent respectivement les estimations obtenues par la méthode de *Niu et al.* (SB), notre méthode basée uniquement sur la classification (CB) et la méthode CSB. (a) Résultats pour le pixel 1 (terreau sablonneux marron), (b) résultats pour le pixel 2 (asphalte), (c) résultats pour le pixel 3 (aluminium), (d) résultats pour le pixel 4 (cuivre).

utilisant la méthode de *Niu et al.* reproduit grossièrement les variations haute-fréquences de la luminance de fond des pixels concernés. Mais une composante similaire à la luminance de fond des classes « majoritaires » vient se rajouter à l'estimation.

Par ailleurs, notre méthode (CB) ne prenant pas en compte la variabilité intra-classe de la luminance de fond, introduit un biais sur l'estimation de L_{off} . Ce biais peut être négatif (pixel 1) ou positif (pixel 2).

Afin d'avoir une visualisation spatiale des performances des trois méthodes comparées, nous avons illustré dans la figure 4.22 l'erreur moyenne sur l'estimation de la luminance de fond, exprimée en terme de température de brillance. Cette figure confirme les résultats que nous avons constaté précédemment. La méthode proposée par *Niu et al.* donne une erreur moyenne de 5 K au maximum pour les pixels des matériaux « majoritaires ». En revanche, dès qu'il s'agit des matériaux moins représentés dans la zone hors panache, l'erreur peut atteindre 45 K . Lorsqu'une classification préa-

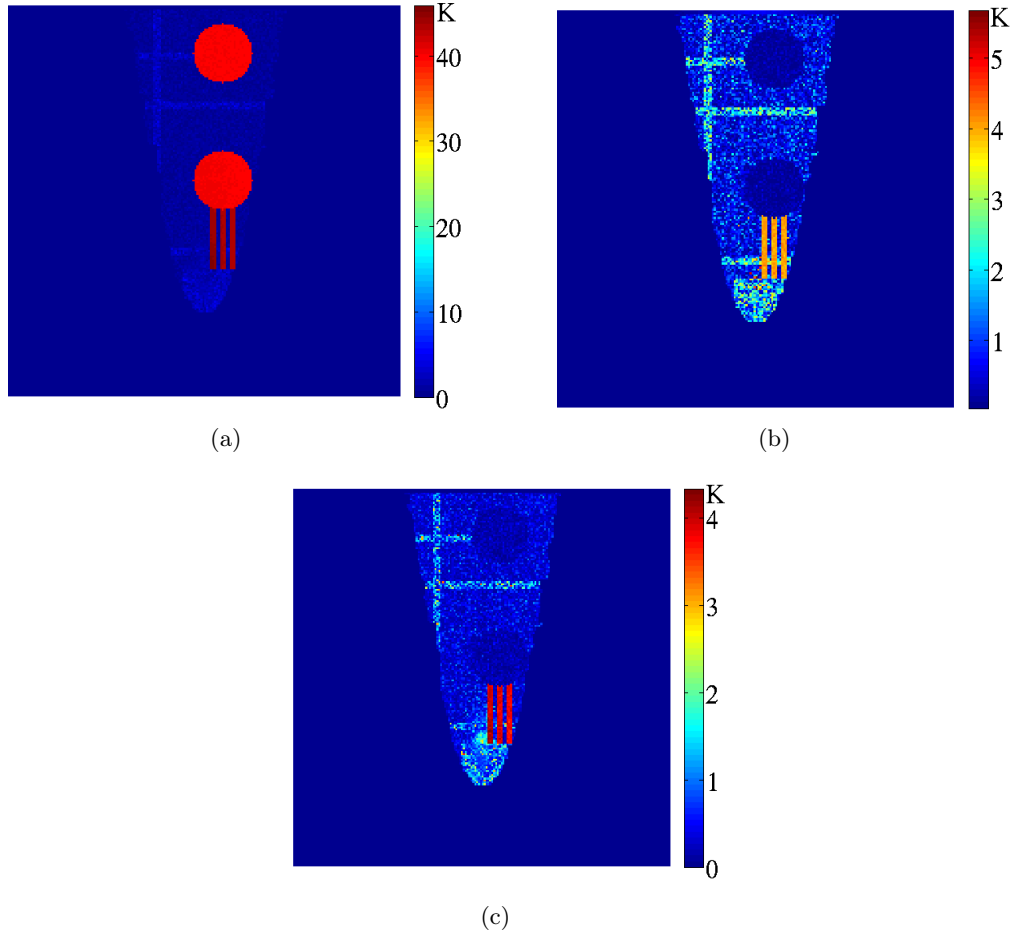


FIGURE 4.22 – Erreur moyenne sur l'estimation de la luminance de fond, exprimée en terme de température de brillance. (a) Erreur moyenne obtenue avec la méthode de *Niu et al.*. (b) Erreur moyenne obtenue avec notre méthode basée uniquement sur la classification (CB). (c) Erreur moyenne obtenue avec la méthode CSB.

lable est utilisée avant l'estimation de la luminance de fond, l'erreur est considérablement réduite. Pour les deux méthodes d'estimation concernées, l'erreur moyenne est au maximum égale à $5.5 K$ sur tout le panache.

Avec ces deux méthodes, la classe représentant le sol en cuivre est celle qui présente les erreurs les plus importantes. Ce qui s'explique, par l'absence de cette classe en dehors du panache de cette scène. L'estimation est alors réalisée en utilisant la classe qui lui est la plus proche, à savoir l'aluminium.

La figure 4.22 montre que la méthode CSB permet un léger gain de précision dans l'estimation de L_{off} , par rapport à la méthode basée uniquement sur la classification.

Perspectives envisagées

L'analyse des résultats que nous venons d'effectuer, nous permet de déduire que les principales erreurs d'estimation de L_{off} sont dues principalement à une mauvaise classification de la scène sous le panache. En particulier, pour les scènes de la cimenterie. L'amélioration de la classification est donc le meilleur moyen d'améliorer notre estimation de la luminance de fond.

Une première piste, qui pourrait être explorée pour l'amélioration de la classification, consiste à faire des classifications itératives en réduisant à chaque étape le seuil de séparation entre classes (D_{max}). Ces classifications s'opèrent sur les zones hétérogènes, qui sont pourtant considérées comme relativement homogènes, vis-à-vis des zones proches de la source du panache. Puisqu'au voisinage de la source, le signal est beaucoup modifié, compte tenu des grandes concentrations de gaz polluants mis en jeu, et surtout des différentiels de températures élevés.

D'autres parts, il est envisageable d'explorer d'autres techniques de classification, qui pourront donner de meilleurs résultats. Par exemple, l'ajout d'informations spatiales dans notre processus de classification est susceptible d'améliorer les performances de celle-ci. Il existe dans la littérature (cf. [90]) plusieurs approches permettant d'intégrer des informations spatiales à la classification. D'autre part, si une image de la scène dans le visible est disponible, on pourra l'utiliser pour améliorer la classification, en particulier pour la zone ne contenant pas de panache.

4.3.5 Performances de l'estimation des paramètres de surfaces

Présentation des résultats

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux performances de notre estimation des paramètres de surface, à savoir la température et l'émissivité du sol.

Nous avons effectué le TES sur nos images synthétiques en utilisant, dans un premier temps, les vraies luminances de fond des pixels. Nous avons, ensuite, appliqué le TES sur les luminances de fond estimées lors de l'étape précédente. La méthode utilisée ici est la méthode CB basée uniquement

sur la classification de la scène, et la mise en correspondance des classes sous et hors panache. Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de ces deux TES.

D’abord, en ce qui concerne la température de surface, nous avons comparé les températures obtenues par les deux TES réalisés (en bande LWIR) avec celles employées pour la génération de nos scènes synthétiques. Les tableaux 4.10 et 4.11 illustrent ces résultats de comparaisons. Pour chaque scénario, nous avons représenté les erreurs moyennes et les écarts-types sur ces erreurs pour chaque matériau de la scène.

Lorsque les vraies luminances de fond des pixels sont utilisées (tableau 4.10), on constate que les résultats (moyennes et écarts-types) diffèrent peu d’un scénario à un autre. Ce qui n’est plus vrai pour le deuxième TES (tableau 4.11). Dans le deuxième cas, les luminances de fond de certains matériaux ne sont pas aussi bien estimées d’un scénario à un autre. Il est donc normal que ces écarts d’estimation se répercutent sur la performance du TES.

On constate que pour le premier TES, lorsqu’il s’agit d’un matériau avec une émissivité proche de 1, l’erreur d’estimation de la température du sol reste très faible : inférieure à 0.06 K en moyenne et avec un écart-type de 0.2 K au maximum. Cependant, pour les quatre matériaux de la scène ayant des émissivités différentes de 1 (Aluminium, Cuivre, Acier et Ardoise), l’erreur sur la température du sol augmente. On constate que, logiquement, plus l’émissivité du matériau s’éloigne de 1 et plus l’erreur d’estimation croît. Elle reste tout de même relativement faible, puisqu’elle ne dépasse pas la valeur de 1.68 K en moyenne. Notons, que pour le Cuivre l’écart-type de l’erreur est très élevé par rapport aux autres matériaux et varie entre $3.92 - 4.16\text{ K}$ selon les scénarii.

Pour le deuxième TES, la performance de l’estimation de la température du sol est très variable d’un matériau à un autre et d’un scénario à un autre. Pour les sols Gazon, Peinture verte olive et Acier, on obtient exactement les mêmes performances que pour le premier TES, ces trois classes de matériaux ne présentant pas de pixels sous les différents panaches de nos scènes synthétiques. De même, les sols en Ardoise, Aluminium et Asphalte ne contiennent du gaz que dans deux des quatre scénarii. Pour les scénarii où ces classes de matériaux ne sont pas présentes sous le panache, les performances d’estimation de température du sol reste inchangées par rapport au premier TES. Pour les autres cas, l’augmentation de l’erreur sur l’estimation de la température du sol est comprise entre $[0.05 - 1.87\text{ K}]$ en moyenne et $[0.21 - 3.13\text{ K}]$ en écart-type.

Sur les figures 4.23 et 4.24, nous avons représenté les deux cas extrêmes d’estimation des émissivités du sol. La figure 4.23 illustre les performances d’estimation des émissivités du sol pour le scénario 1a ; tandis que la figure 4.24 correspond au scénario 2a. Dans chacune des figures, nous avons re-

Matériau / scénario	Erreur moyenne (en K)				Écart type (en K)			
	1a	1b	2a	2b	1a	1b	2a	2b
Terreau sablonneux marron	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15
Route asphalte	0.05	0.05	0.04	0.05	0.14	0.14	0.14	0.14
Brique rouge	0.00	-0.03	-0.04	-0.02	0.18	0.20	0.19	0.18
Peinture verte olive	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.16	0.16	0.16
Toiture en aluminium érodé	0.94	0.90	0.92	1.02	1.71	1.73	1.75	1.70
Pavé en ciment	0.06	0.06	0.06	0.06	0.15	0.14	0.14	0.14
Ardoise	0.25	0.26	0.26	0.25	0.35	0.35	0.35	0.35
Métal cuivre 10 ans	-1.48	-1.68	-0.92	-1.31	4.16	4.02	3.92	4.10
Acier galvanisé oxydé	-0.23	0.24	-0.22	-0.14	0.59	0.58	0.53	0.63
Gazon	0.04	0.04	0.04	0.04	0.11	0.11	0.11	0.11

TABLE 4.10: Performance du TES, en bande LWIR, pour l'estimation de la température du sol des différents scénarii des scènes synthétiques. Le TES a été appliqué sur les vraies luminances de fond des différents pixels. Les quatre premières colonnes représentent, pour chaque matériau, l'écart moyen entre les températures retrouvées et les vraies températures du sol. Les autres colonnes représentent les écarts-types de cette différence pour chacun des matériaux.

Matériau / scénario	Erreur moyenne (en K)				Écart type (en K)			
	1a	1b	2a	2b	1a	1b	2a	2b
Terreau sablonneux marron	0.20	0.25	0.08	0.22	0.58	0.58	0.38	1.17
Route asphalte	0.35	0.20	0.05	0.05	1.12	0.51	0.14	0.14
Brique rouge	0.62	0.91	0.24	0.13	1.22	1.01	0.74	1.13
Peinture verte olive	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.16	0.17	0.16
Toiture en aluminium érodé	0.69	1.26	1.10	0.98	1.96	1.94	1.79	2.00
Pavé en ciment	0.37	0.40	0.53	0.62	1.09	0.81	0.90	1.05
Ardoise	0.26	0.25	-1.29	-0.83	0.35	0.35	3.32	1.82
Métal cuivre 10 ans	-1.43	-0.63	0.95	-1.37	2.95	2.95	7.05	3.53
Acier galvanisé oxydé	-0.24	-0.23	-0.14	-0.20	0.59	0.59	0.54	0.50
Gazon	0.04	0.04	0.04	0.03	0.11	0.11	0.11	0.11

TABLE 4.11: Performance du TES, en bande LWIR, pour l'estimation de la température du sol des différents scénarii des scènes synthétiques. Le TES a été appliqué sur les luminances de fond estimées par mise en correspondance des classes hors et sous le panache. Les quatre premières colonnes représentent, pour chaque matériau, l'écart moyen entre les températures retrouvées et les vraies températures du sol. Les autres colonnes représentent les écarts-types de cette différence pour chacun des matériaux.

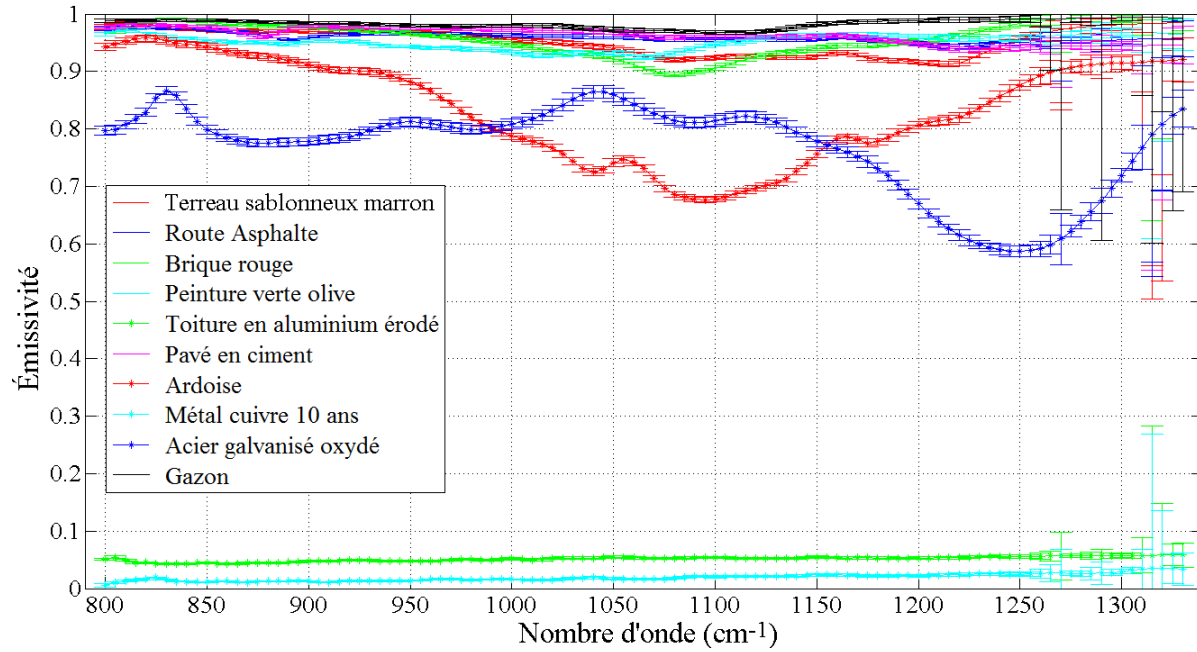
présenté les écarts-types des émissivités retrouvées pour chaque matériau de la scène, lors des deux TES réalisés. Notons que les courbes moyennes correspondent aux vraies émissivités des matériaux et non pas aux émissivités moyennes retrouvées. L'écart relatif entre ces émissivités ne dépasse pas les 0.5 % pour le premier TES. En revanche cet écart atteint au maximum 9 % pour le deuxième TES.

On remarque que pour les nombres d'onde supérieurs à 1250 cm^{-1} , les écarts-types des émissivités de tous les matériaux augmentent beaucoup. L'explication réside dans une transmission atmosphérique très faible dans ce domaine, ce qui perturbe la correction atmosphérique effectuée lors du TES. De plus, ce domaine n'est pas utilisé lors du calcul de la température optimale du sol.

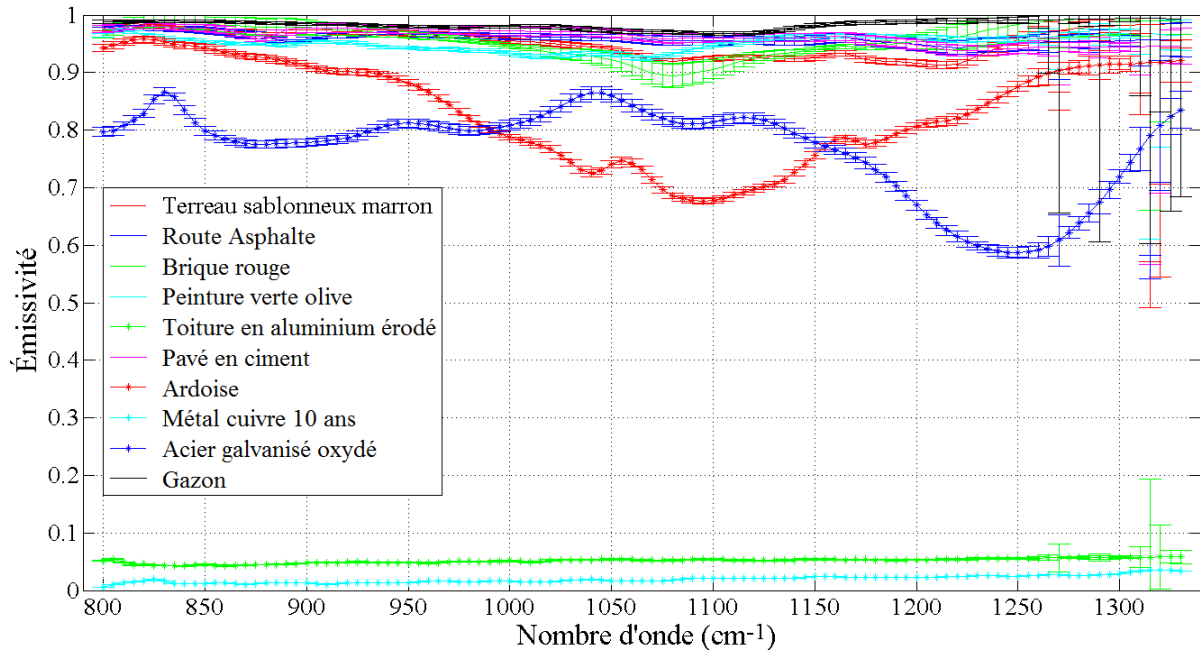
Pour le cas du scénario 1a (figure 4.23), les écarts d'estimations entre les deux TES ne sont visibles que pour le matériau Brique rouge. Pour les autres matériaux, les écarts-types des émissivités retrouvées par ces deux TES, sont très proches.

En revanche, pour le deuxième scénario (figure 4.24), les classes du Terreau sablonneux, du Cuivre et de l'Ardoise voient leurs écarts-types augmenter, lorsque le TES fait appel aux luminances de fond estimées. Cette augmentation reste relativement faible pour les deux premières classes, mais elle devient excessive pour la classe de l'Ardoise. En effet, les pixels de ces trois classes ont été classifiés dans d'autres classes de matériaux, où ils restaient minoritaires. Lors de l'estimation de la luminance de fond, une luminance correspondant à un matériau leur a été attribuée. Cette erreur se répercute lors du TES, où on leur associe une émissivité d'un autre matériau. Dans le cas du Terreau sablonneux et du Cuivre, cette dernière n'est pas très éloignée de l'émissivité de ces deux matériaux. Par contre, dans le cas de l'Ardoise, l'émissivité associée est très différente de celle de l'Ardoise. D'où les très grandes valeurs de l'écart-type pour certains nombres d'onde.

Par ailleurs, il faut noter que malgré de très grandes erreurs en terme d'estimation de la température du sol pour la classe du Cuivre (écart-type de 7.05 pour le scénario 2a), les erreurs sur l'estimation de l'émissivité restent relativement faibles. Paradoxalement, avec des erreurs plus faibles lors de l'estimation de la température du sol (écart-type de 3.32 pour le scénario 2a), les erreurs obtenues pour l'estimation de l'émissivité sont plus importantes. En effet, lors de la classification les pixels du Cuivre ont été classifiés avec des pixels d'Aluminium ayant des températures plus éloignés et des émissivités plus proches. Tandis que les matériaux classifiés avec les pixels en Ardoise, ont des températures du sol proches de celle de l'Ardoise, mais leurs émissivités sont éloignées de celle de l'Ardoise.

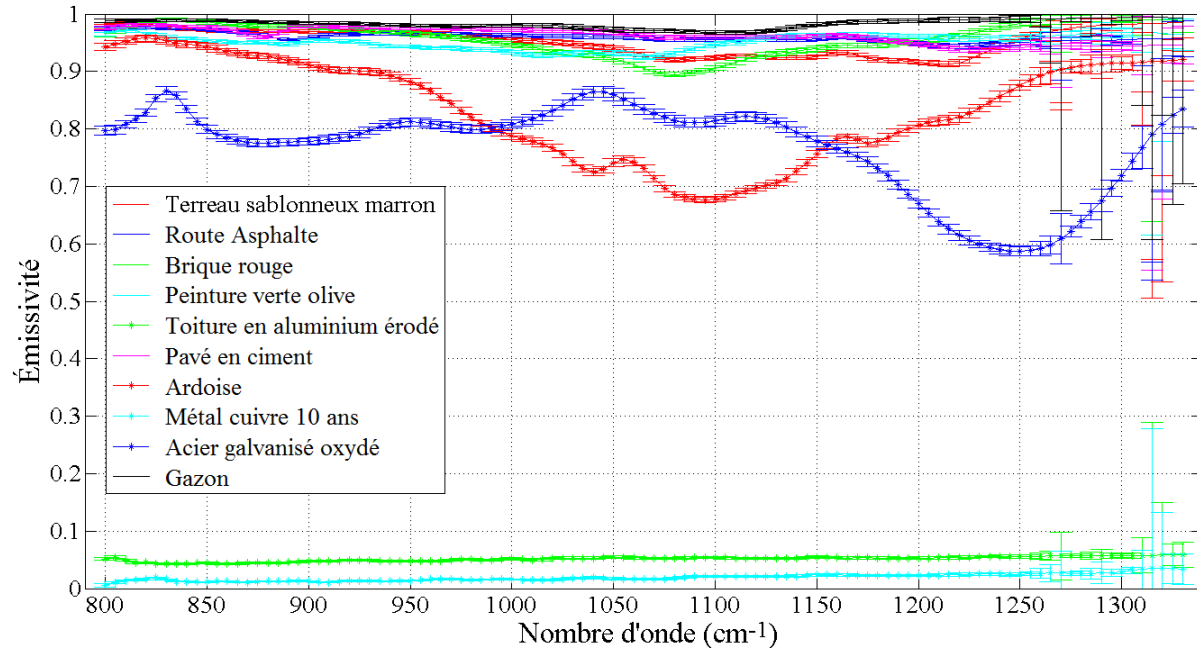


(a)

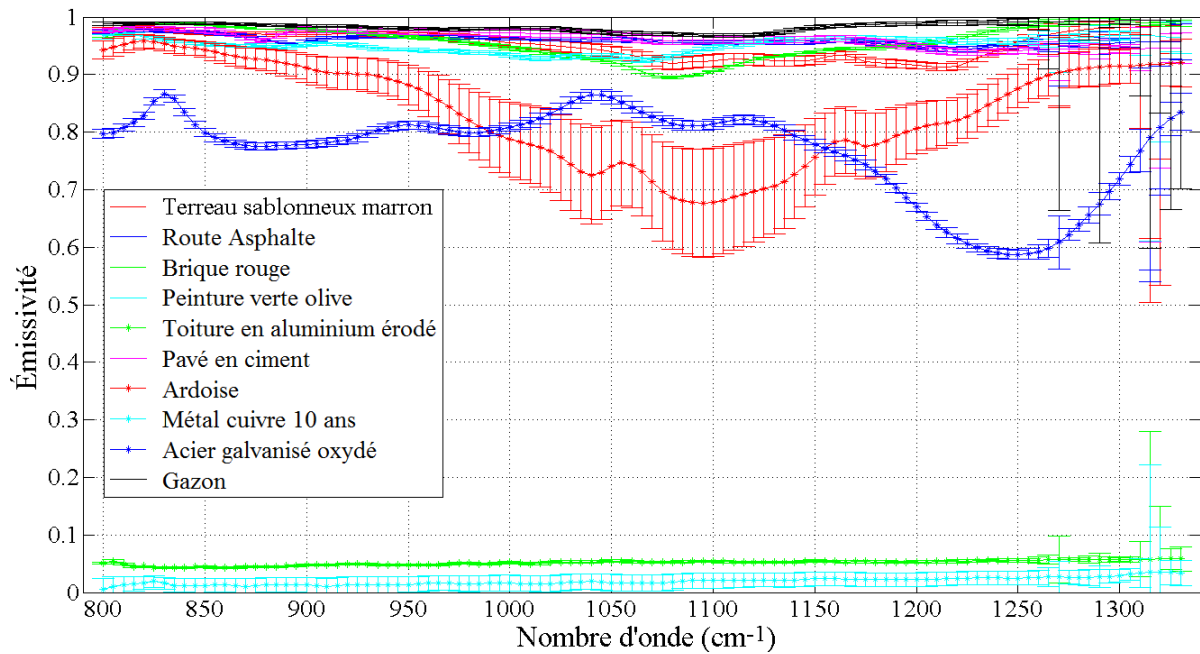


(b)

FIGURE 4.23 – Résultats de l'estimation des émissivités du sol pour la scène de raffinerie (scénario 1a) en bande LWIR. Les vraies émissivités des matériaux ont été représentées avec les écarts-types de l'estimation pour chaque nombre d'onde. (a) TES réalisé à partir des vraies luminances de fond. (b) TES réalisé à partir des luminances de fond estimées précédemment.



(a)



(b)

FIGURE 4.24 – Résultats de l'estimation des émissivités du sol pour la scène de cimenterie (scénario 2a) en bande LWIR. Les vraies émissivités des matériaux ont été représentées avec les écarts-types de l'estimation pour chaque nombre d'onde. (a) TES réalisé à partir des vraies luminances de fond. (b) TES réalisé à partir des luminances de fond estimées précédemment.

Perspectives envisagées

Dans cette partie nous avons présenté les résultats des TES réalisés en bande LWIR. Ces derniers permettent, d'une part, d'analyser les performances de l'algorithme de TES réalisé, lorsqu'on l'applique en utilisant les vraies luminances de fond. Dans ce premier cas, les résultats sont très performants. Le TES permet donc de retrouver la température et l'émissivité avec très peu d'erreurs, à condition de travailler dans l'intervalle spectral $[800 - 1250 \text{ cm}^{-1}]$.

D'autre, part, lorsque le TES est appliqué en utilisant les luminances estimées, avec notre méthode présentée précédemment, les erreurs d'estimation de la luminance de fond se répercutent sur l'estimation des paramètres du sol.

On en déduit que pour améliorer les performances du TES, il faut essentiellement travailler sur l'amélioration de l'estimation de la luminance de fond, et non pas sur l'algorithme du TES. Ce qui a déjà été fait en partie avec l'introduction de la méthode CSB introduite dans le paragraphe § 4.3.4.

Par ailleurs, à ce stade nous n'avons pas réussi à obtenir des résultats satisfaisants en bande MWIR, avec l'algorithme utilisé. C'est la raison pour laquelle ces résultats ne figurent pas dans le présent document. Il est donc envisagé pour la suite de ces travaux, de réussir à obtenir une estimation des paramètres du sol en bande MWIR.

Lorsqu'il sera nécessaire, nous utiliserons les températures et les émissivités vraies des pixels de nos scènes synthétiques. Rappelons que les seules images en bande MWIR dont nous disposons sont nos images synthétiques, où nous maîtrisons tous les paramètres de la scène.

4.3.6 Étude de l'approche linéaire pour l'initialisation de CONLIE

Dans cette sous-section nous allons présenter les résultats que nous avons obtenus lors de l'initialisation de CONLIE. Cette étude s'est restreinte uniquement à la bande LWIR ($[800 - 1250 \text{ cm}^{-1}]$). Dans un premier temps, nous comparerons les performances des trois estimations de la température du panache, que nous avons introduites dans la section précédente. Nous choisirons celle donnant la meilleure estimation. On parlera indifféremment d'estimation de la température du panache ou de l'écart de température entre le panache et l'atmosphère ambiante, car la température de l'atmosphère ambiante est supposée connue et constante sur toute la scène.

Ensuite, nous illustrerons les concentrations estimées lors de cette phase d'initialisation.

Estimation de la température du panache

Dans le but de comparer les trois méthodes d'estimation de la température du panache, nous avons défini un certain nombre de scénarii, dans lesquels nous avons fait varier différents paramètres (émissivité du sol, épaisseur du panache, différence de température entre le panache et l'atmosphère etc).

Ainsi, nous avons testé les trois méthodes sur deux types de sol. Le premier, constitué de terreau sablonneux marron, permet d'évaluer les performances de ces méthodes pour des émissivités proches de 1. Tandis que le deuxième sol est en aluminium, représentant les faibles émissivités.

Pour évaluer l'impact de l'épaisseur du panache nous avons appliqué les trois méthodes sur des panaches d'épaisseur : 50, 100, 200 et 460 *m*. Rappelons que les trois méthodes sont basées sur l'hypothèse que le panache a une température homogène sur toute son épaisseur.

Le dernier paramètre que nous avons considéré dans notre comparaison est l'écart de température entre le panache et l'atmosphère ambiante. Les tests ont été faits pour différents écarts de température allant de -100 K à 100 K .

Pour chacune des configurations des paramètres sélectionnés, nous réalisons deux simulations MODTRAN. À partir de ces simulations, sont calculés les différents termes impliqués dans l'une des trois méthodes d'estimation de la température du panache.

Sur la figure 4.25, une synthèse des résultats obtenus lors de cette comparaison est présentée. Les figures 4.25-(a), (b) et (c) correspondent respectivement aux résultats des **méthodes 1**, **1bis** et **2**, pour l'estimation de la température du panache. Nous y avons tracé l'écart de température ΔT entre le panache et l'atmosphère ambiante de la couche, que nous estimons en fonction du vrai écart de température. Sur ces figures, deux compositions du sol (terreau sablonneux marron et aluminium), et plusieurs épaisseurs du panache ont été représentés.

Les courbes représentées montrent que les trois méthodes ont de bons résultats pour les faibles valeurs de ΔT . Lorsque les écarts de températures entre le panache et l'atmosphère sont inférieurs à 10 K , les estimations obtenues sont acceptables. En moyenne, l'erreur relative est de 36 % sur cette gamme, pour l'ensemble des trois méthodes.

Dès que l'écart de température est négatif (gaz plus froid que l'atmosphère non polluée), les **méthodes 1** et **1bis** se révèlent obsolètes pour l'estimation de ΔT . Ceci est dû au fait que ces deux méthodes calculent la température du panache, comme étant la valeur maximale de la température de brillance issues des formules 4.16 et 4.17.

Pour les écarts de températures supérieures à 20 K , les **méthodes 1** et **1bis** donnent de meilleurs résultats que la **méthode 2**.

Contrairement à ce à quoi on pourrait s'attendre, l'impact de l'émissivité du sol sur l'estimation de la température du panache n'est pas aussi évident à comprendre. En effet, étant donné les hypothèses retenues, on s'attend à ce que ce paramètre n'ait pas d'impact sur l'estimation de la **méthode 1**. En revanche, pour les deux autres méthodes, où l'émissivité est supposée égale à 1, on

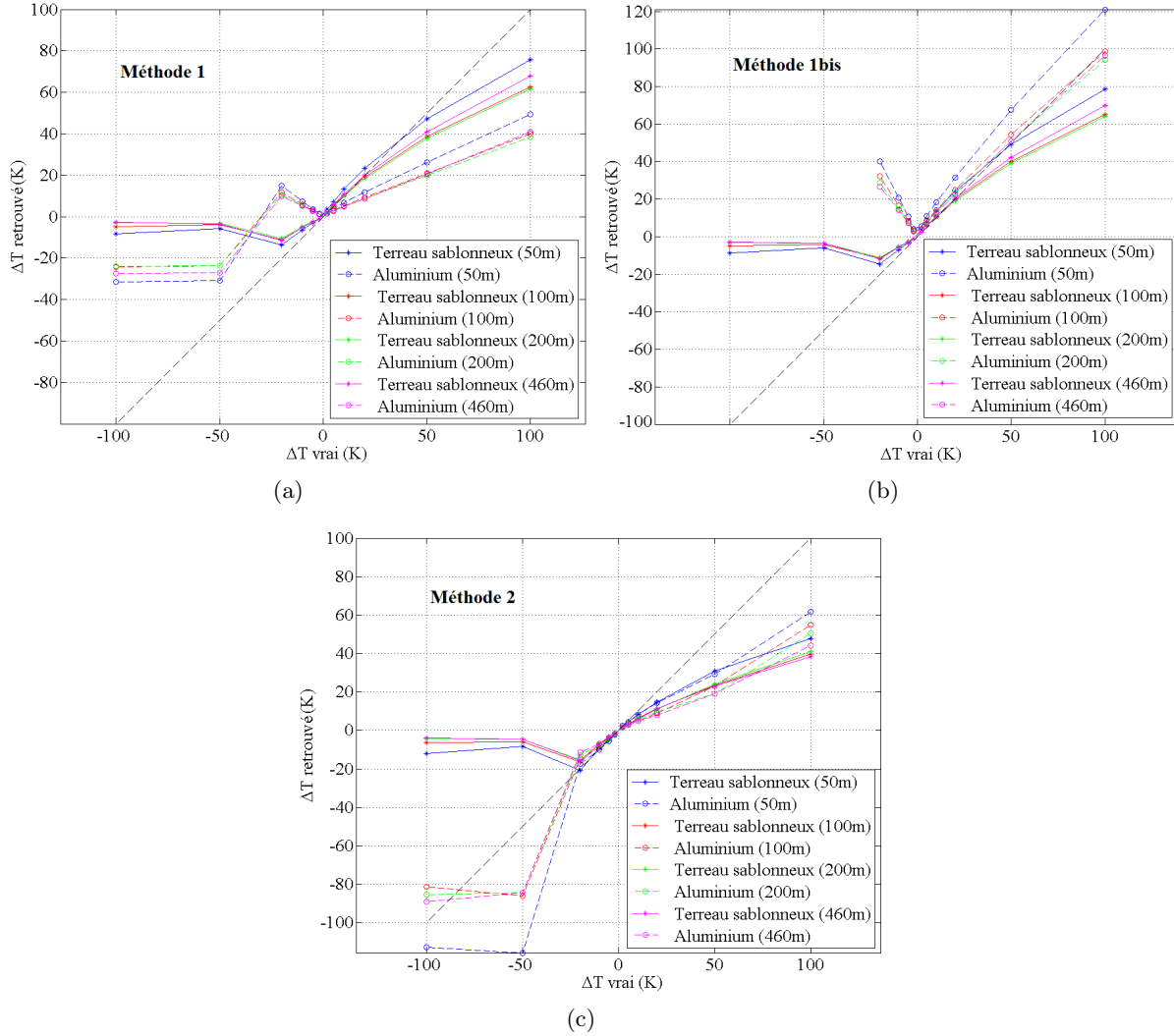


FIGURE 4.25 – Résultats de la comparaison des méthodes d'estimation de la température du panache. Pour chacune des trois méthodes, nous avons représenté les écarts de températures entre le panache et l'atmosphère ambiante estimés en fonction des vraies écarts de température. Pour chaque méthode, nous avons illustré les résultats obtenus pour différents composition du sol (terreau sablonneux marron et aluminium) et plusieurs épaisseurs du panache (50, 100, 200 et 460 m). (a) Résultats obtenus en utilisant la **méthode 1**. (b) Résultats obtenus en utilisant la **méthode 1bis**. (c) Résultats obtenus en utilisant la **méthode 2**.

s'attend à ce que les résultats ne soient pas exploitables pour des faibles émissivités.

La figure 4.25-(a) montre que la **méthode 1** estime mieux la température du panache, lorsque l'émissivité du sol est proche de 1 (terreau sablonneux marron). Avec les deux autres méthodes, l'estimation est relativement meilleure pour le terreau sablonneux que pour l'aluminium, à faibles valeurs du ΔT . Cependant, cette tendance semble s'inverser pour les forts écarts de températures. Lors de notre étude, nous n'avons pas pu trouver une explication convaincante de cette observation. Mais il semblerait que le fait de ne pas prendre en compte le terme τ_p (cf. équation 4.16), améliore les résultats pour des température du panache élevées. Ce terme dépend effectivement de la température du panache à travers le coefficient d'absorption de l'eau ($\kappa_{\text{H}_2\text{O}}$). Or, nous avons négligé dans notre modèle la dépendance de $\kappa_{\text{H}_2\text{O}}$ en fonction de la température du panache.

Le dernier paramètre auquel nous nous sommes intéressés lors de notre étude est l'épaisseur du panache. En effet, l'hypothèse d'un panache homogène n'est valide que pour des faibles épaisseurs. Il est donc important d'étudier l'impact de ce paramètre sur nos trois méthodes d'estimation de ΔT . En analysant les trois figures 4.25-(a), (b) et (c), on constate de façon générale que plus l'épaisseur du panache est faible et meilleure est l'estimation de la température du panache. Cette remarque est d'autant plus vraie que la température du panache est élevée. À titre d'exemple, pour un écart de température de 50 K entre le panache et l'atmosphère ambiante, la **méthode 1** estime cet écart à 40.95 K , lorsque l'épaisseur du panache est de 460 m (sol constitué de terreau). En revanche, l'estimation est de 47.31 K pour une épaisseur de 50 m .

Lorsque nous avons simulé les panaches de nos scènes synthétiques, nous avons utilisé un modèle de panache multi-couches. L'échantillonnage du panache choisi est constitué de couches de 20 m d'épaisseur entre le sol (0 m) et l'altitude du haut du panache (460 m). Seulement, nous avons constaté que pour tous nos scénarii, à partir d'une altitude de 100 m , la concentration des gaz est quasi nulle. En conséquence, lors de l'estimation de la température du panache, nous avons imposé l'épaisseur du panache à 100 m . Ce choix permet d'améliorer notre estimation, tout en restant cohérent avec notre modélisation des scènes synthétiques.

Lors de cette étude, nous nous sommes intéressés à deux types de modélisations du panache : le premier, dont nous avons détaillé les résultats ci-dessus, correspond à un panache où les températures du panache et de l'atmosphère ambiante sont homogènes sur toute l'épaisseur du panache. Un deuxième cas étudié correspond à un panache où seul l'écart de température entre le panache et l'atmosphère ambiante reste homogène sur toute l'épaisseur du panache. La température de l'atmosphère ambiante décroît linéairement avec l'altitude au sein du panache.

Les résultats obtenus avec cette deuxième modélisation du panache sont très similaires à ceux déjà présentés ci-dessus. C'est la raison pour laquelle, nous avons jugé inutile d'illustrer les résultats de

cette deuxième modélisation de panache.

Enfin, il nous a semblé judicieux de combiner les résultats des méthodes étudiées pour améliorer notre estimation. En effet, la figure 4.25 montre que la **méthode 2** donne de meilleures estimations pour des faibles écarts de températures. Mais dès que l'écart de température dépasse 10 K , les deux autres méthodes donnent de meilleurs résultats. Pour cette gamme de ΔT ($[10 - 100 K]$), la différence entre les deux **méthodes 1** et **1bis** apparaît uniquement pour les matériaux à faibles émissivités ; où la **méthode 1bis** est plus performante.

Ainsi, dans la suite de notre travail, nous utiliserons la **méthode 2** pour estimer l'écart de température entre le panache et l'atmosphère. Dès que l'écart retrouvé est supérieur à 10 K , nous appliquerons la **méthode 1bis** afin d'améliorer l'estimation.

Sur la figure 4.26 nous avons illustré les écarts de température entre le panache et l'atmosphère ambiante retrouvés sur nos quatre scénarii en bande LWIR, en utilisant la nouvelle méthode que nous venons de décrire.

Nous constatons sur cette figure, que l'estimation de la température du panache dépend beaucoup de la composition du sol : plus le ΔT augmente et plus notre estimation donne des résultats très différents entre matériaux émissifs et réfléchifs. Par comparaison aux profils vraies des écarts de températures de forme gaussienne, on peut déduire que l'estimation est meilleure pour les matériaux réfléchifs.

On remarque, de surcroît, que notre estimation est assez bruitée. Pour certains pixels ne contenant pas de panache, le bruit peut atteindre 10 K . Il faut noter aussi que ce bruit d'estimation est nettement plus faible pour les pixels réfléchifs.

Dans le scénario 2b de la cimenterie, l'écart de température introduit a été multiplié par deux par rapport à celui du scénario 2a. Ce rapport semble être respecté entre les deux estimations de ΔT pour ces deux scénarii.

Estimation de la concentration du panache

Dans ce qui a précédé, nous avons expliqué comment sont déterminés les différents paramètres de la scène (luminance de fond, paramètres du sol, température du panache). À présent, il est possible d'appliquer l'équation 4.9 pour déterminer les contrastes thermiques pour chacun des pixels du panache. Puis, en utilisant la formule 4.10, nous pourrions estimer les concentrations intégrées (q_g) des différents gaz du panache.

Les figures 4.27 et 4.28 représentent les concentrations intégrées estimées pour les principaux gaz de nos scènes synthétiques. Ainsi, sur la figure 4.27 nous pouvons voir les résultats de l'estimation des concentrations sur les deux scénarii de la raffinerie. Alors que la figure 4.28 correspond aux

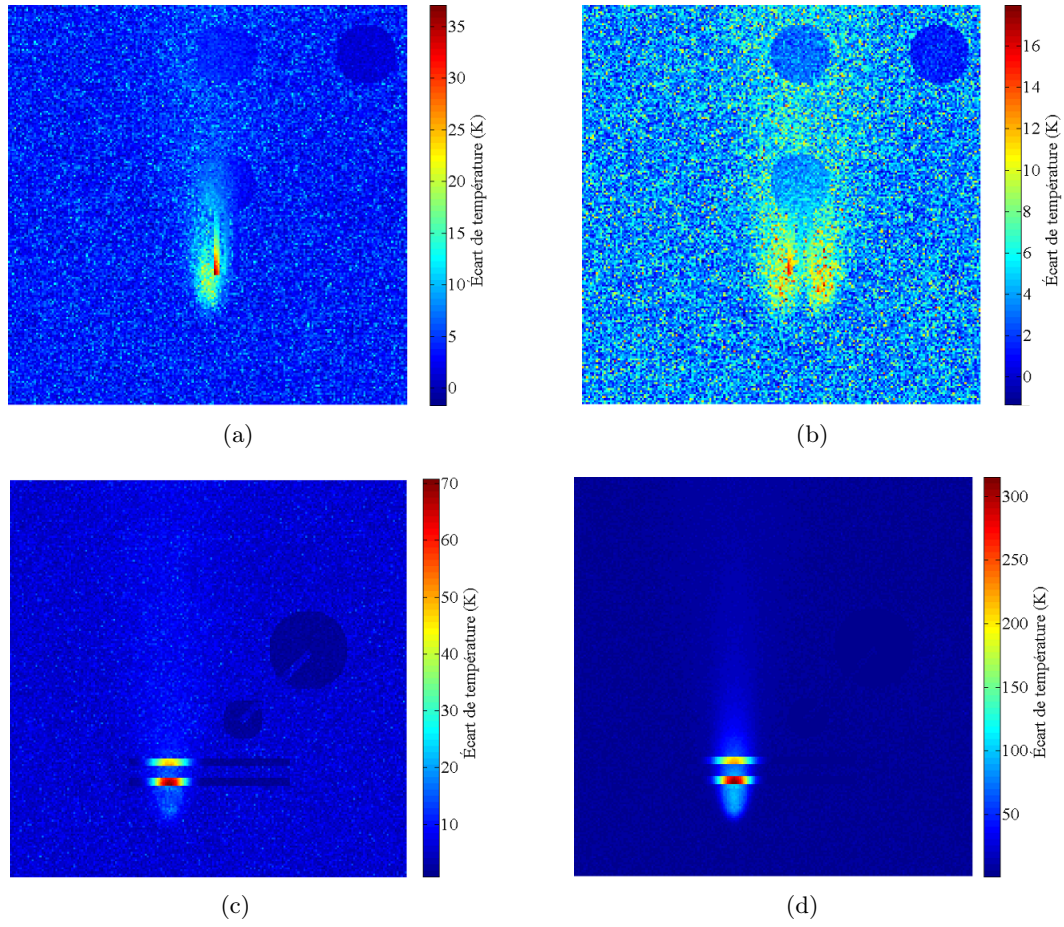


FIGURE 4.26 – Écarts de température estimés entre le panache et l’atmosphère ambiante. (a) Application à la scène de raffinerie (scénario 1a). (b) Application à la scène de raffinerie (scénario 1b). (c) Application à la scène de cimenterie (scénario 2a). (d) Application à la scène de cimenterie (scénario 2b).

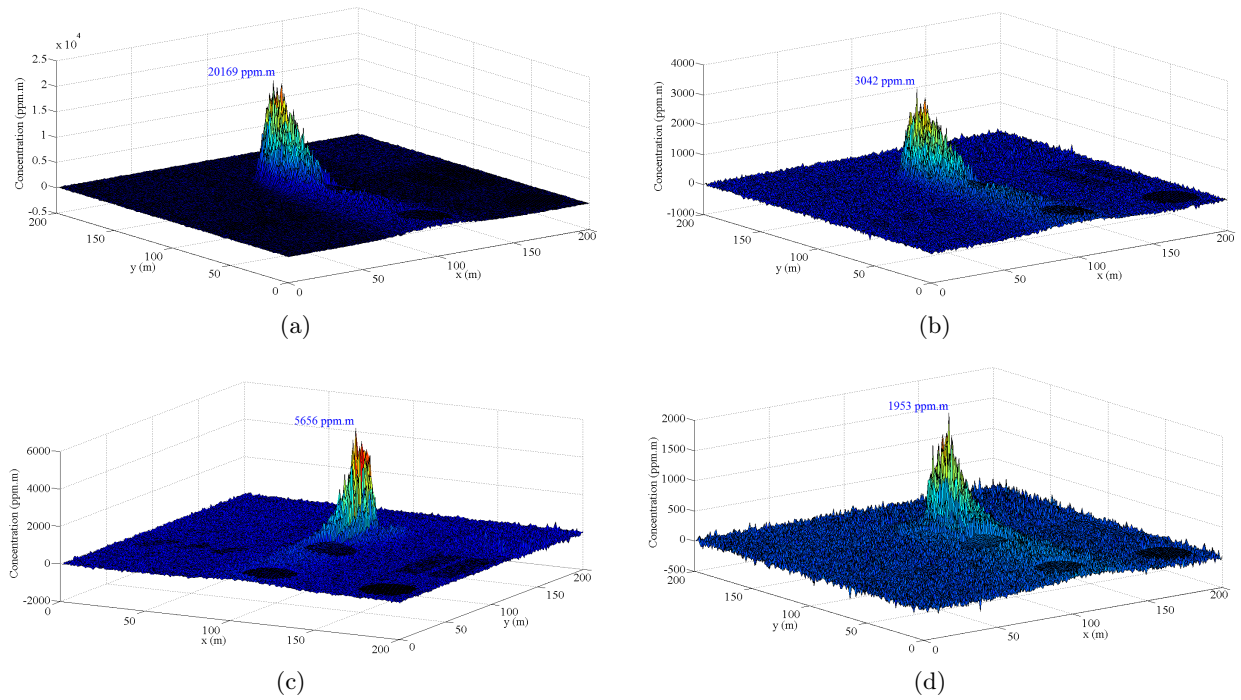


FIGURE 4.27 – Résultats de l'estimation avec l'approche linéaire des concentrations intégrées des gaz de la raffinerie. (a) Concentration estimée pour le SO_2 (scénario 1a). (b) Concentration estimée pour le NH_3 (scénario 1a). (c) Concentration estimée pour le SO_2 (scénario 1b). (d) Concentration estimée pour le NH_3 (scénario 1b).

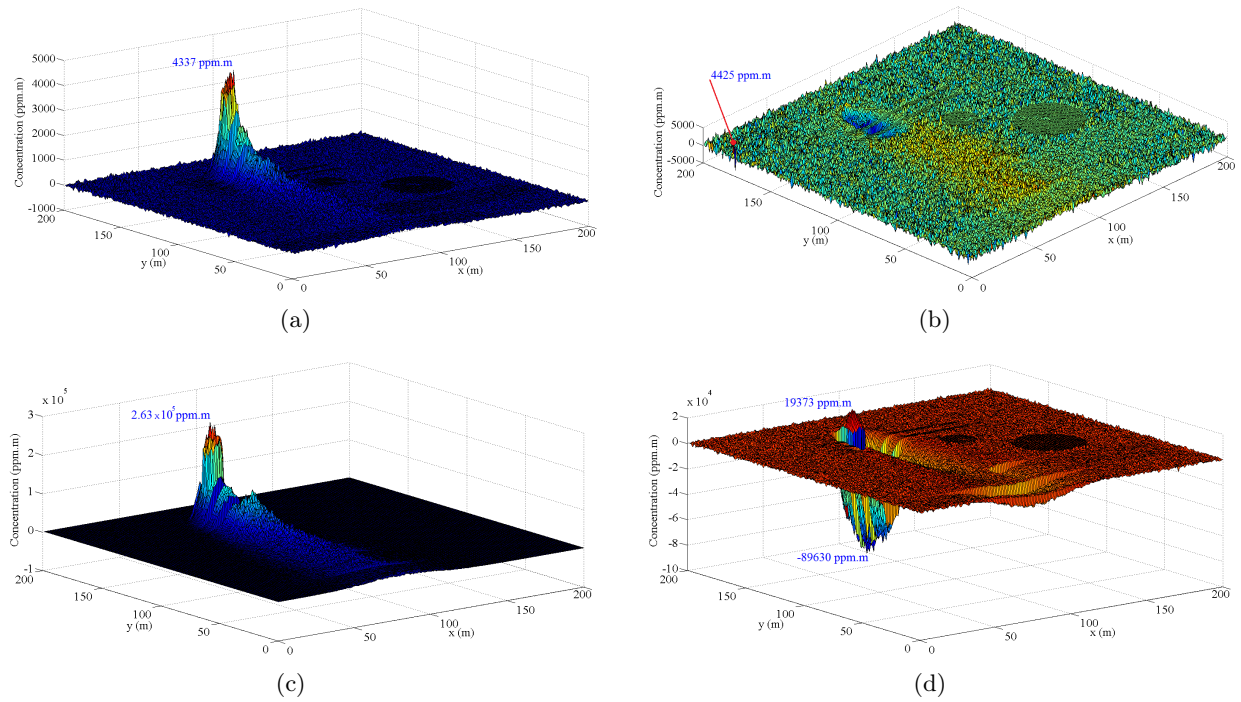


FIGURE 4.28 – Résultats de l'estimation avec l'approche linéaire des concentrations intégrées des gaz de la cimenterie. (a) Concentration estimée pour le SO_2 (scénario 2a). (b) Concentration estimée pour le NO_2 (scénario 2a). (c) Concentration estimée pour le SO_2 (scénario 2b). (d) Concentration estimée pour le NO_2 (scénario 2b).

scénarii de la cimenterie. Les gaz retenus sont le SO_2 et le NH_3 pour la raffinerie, et le SO_2 et le NO_2 pour la cimenterie. Pour le scénario 2a, la concentration du NO_2 est au maximum égale à $142.82 \text{ ppm} \cdot \text{m}$. D'après les seuils présentés dans le tableau 4.1, ce gaz n'est donc pas détectable pour ce scénario. En revanche pour le scénario 2b, la concentration du NO_2 dépasse le seuil de détection, mais uniquement au voisinage de la source. En conséquence, les résultats portant sur ce gaz ne sont pas très pertinents.

Les figures 4.27 et 4.28 montrent que la quantification des gaz par la méthode OLS est très bruitée. On constate que même pour des pixels ne contenant pas de panache, cette approche peut retourner des concentrations assez élevées (jusqu'à $1082 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ pour le SO_2 du panache 1b). La présence de ce bruit s'explique par des erreurs de calcul des contrastes thermiques. Lorsque l'équation 4.9 est utilisée, on essaye d'attribuer à chaque gaz sa participation dans le signal de la luminance différentielle. Dès qu'il y a une erreur sur les contrastes thermiques des gaz atmosphériques, cette dernière se répercute directement sur les gaz de pollution. Par ailleurs, plus l'amplitude de l'absorbance d'un gaz est faible et plus la concentration retrouvée est grande, afin de compenser l'erreur sur le calcul du contraste thermique. C'est la raison pour laquelle l'erreur sur le NO_2 est la plus importante, étant donnée sa faible absorbance (cf. figure 1.4).

Par ailleurs, nous observons que la quantification employée est dépendante de la composition du sol. Elle est meilleure pour les pixels réfléchifs, comme le confirme les figures 4.29, 4.30 et 4.31. On voit par exemple (figure 4.29) que les gaz sont mieux quantifiés pour les pixels de la toiture en aluminium, que pour les autres pixels de la coupe. De même, dans le cas de la cimenterie (cf. figure 4.31-(a) et (b)), la concentration du SO_2 est mieux estimée pour les pixels en ardoise et en cuivre que pour les autres pixels. Ces matériaux ayant des émissivités plus faibles.

Cette dépendance des performances de la quantification avec l'émissivité du sol, s'explique par une température de brillance plus faible chez les matériaux réfléchifs. À concentrations et température de panache égales, les contrastes thermiques seront plus importants pour ces matériaux. Le rapport signal à bruit sera donc plus important pour ces pixels.

Par contre, dans le cas d'un panache plus froid que l'atmosphère, cette tendance pourra s'inverser. La quantification sera plus performante pour les pixels émissifs.

De plus, les résultats présentés ici, confirment que la quantification issue de l'approche linéaire donnent de meilleures performances pour les faibles concentrations. Mais dès que les concentrations mises en jeu augmentent, les performances de la quantification linéaire se dégradent, et peuvent même atteindre des erreurs de l'ordre de 500 % comme on peut le voir sur la figure 4.30.

Afin d'avoir une évaluation quantitative des performances de la quantification utilisée, nous avons

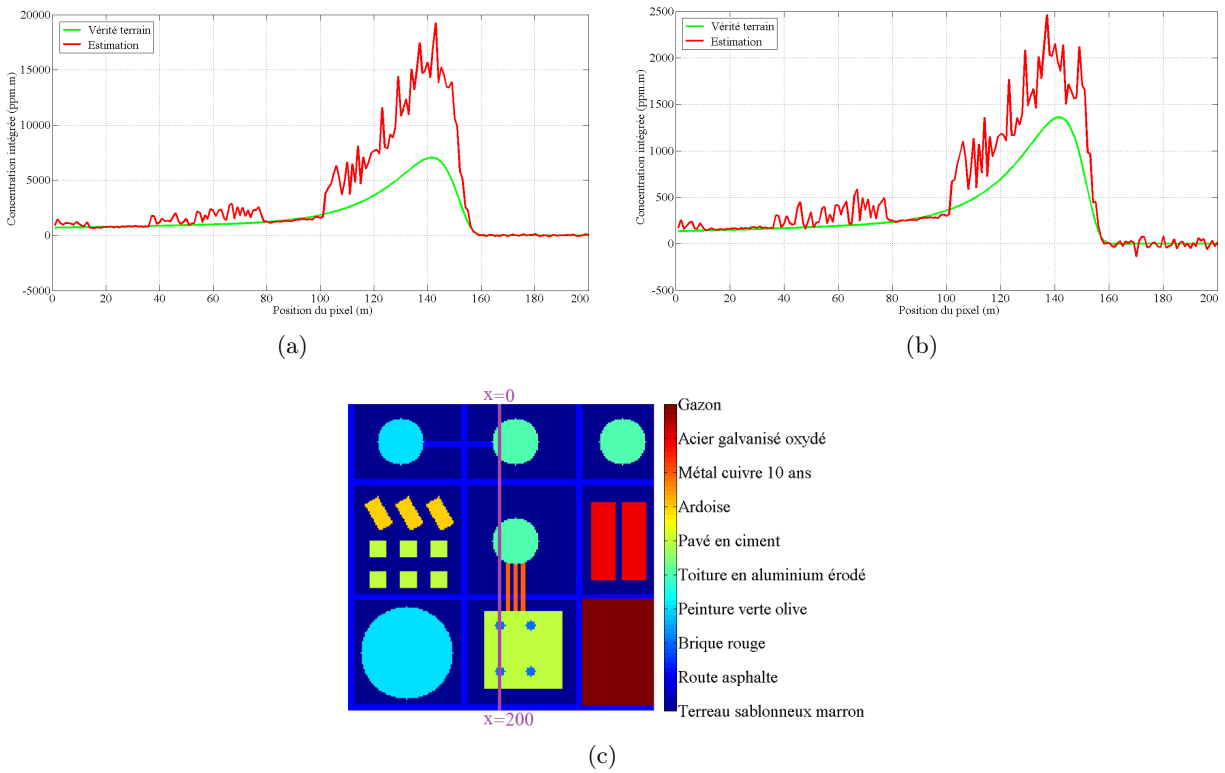


FIGURE 4.29 – Comparaison des résultats de l'estimation linéaire des concentrations intégrées des gaz de la raffinerie, avec les vraies concentrations. Cette comparaison a été effectuée sur une coupe longitudinale de la scène incluant la source du panache. (a) Concentrations intégrées du SO_2 dans le scénario 1a. (b) Concentrations intégrées du NH_3 dans le scénario 1a. (c) Plan de répartition des matériaux du sol à travers la scène, avec illustration de la coupe longitudinale utilisée.

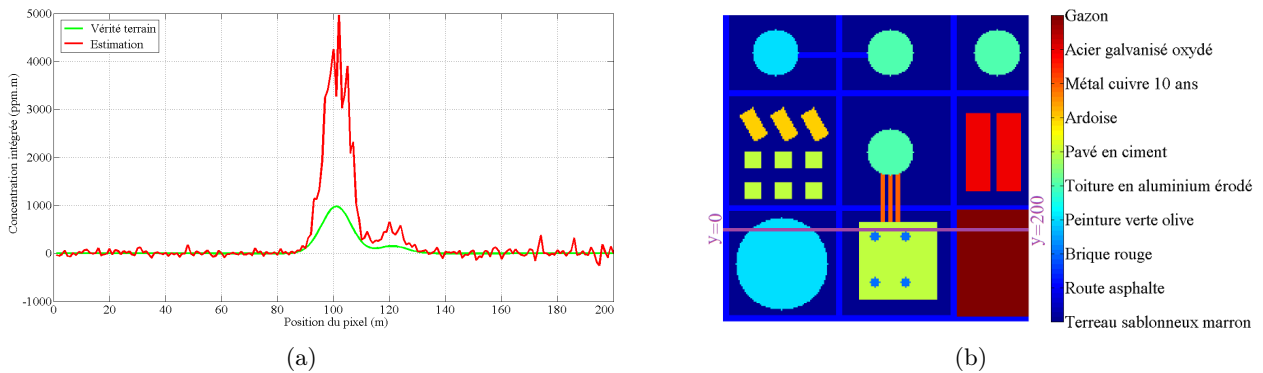


FIGURE 4.30 – Comparaison des résultats de l'estimation linéaire des concentrations intégrées des gaz de la raffinerie, avec les vraies concentrations. Cette comparaison a été effectuée sur une coupe transversale de la scène. (a) Concentrations intégrées du SO_2 dans le scénario 1b. (b) Plan de répartition des matériaux du sol à travers la scène, avec illustration de la coupe transversale utilisée.

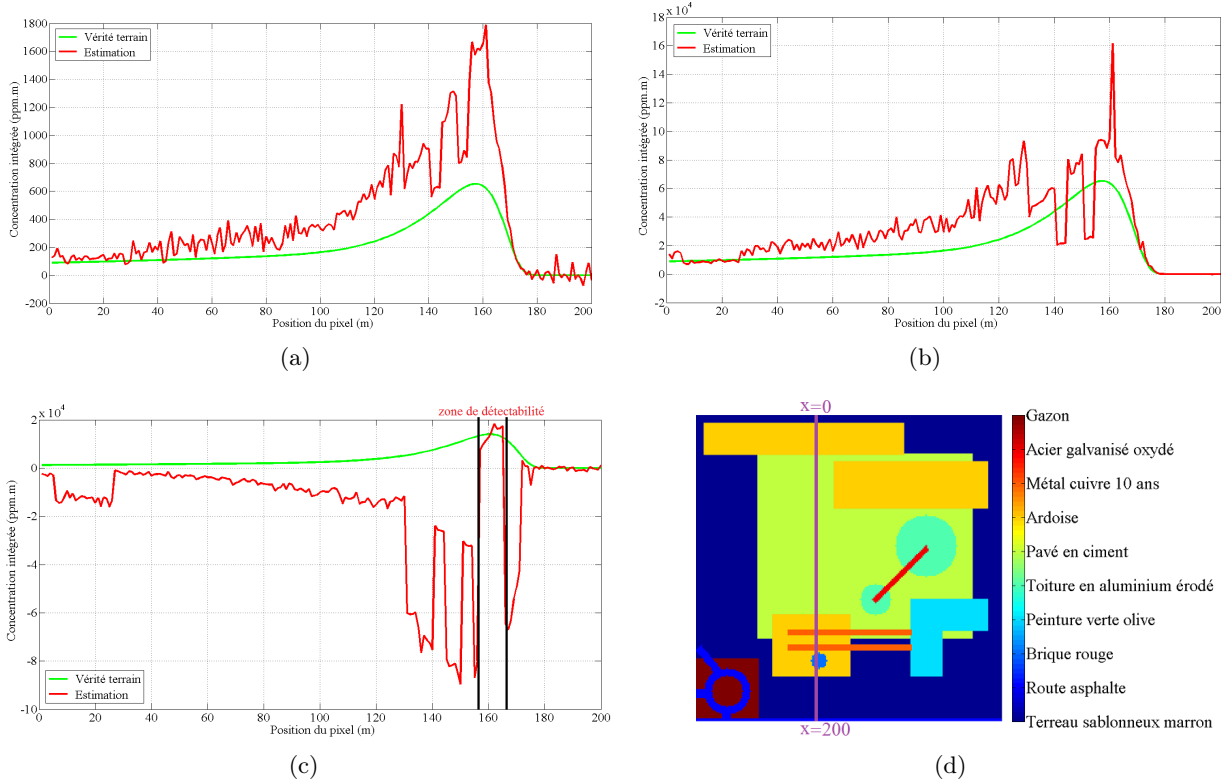


FIGURE 4.31 – Comparaison des résultats de l'estimation linéaire des concentrations intégrées des gaz de la cimenterie, avec les vraies concentrations. Cette comparaison a été effectuée sur une coupe longitudinale de la scène incluant la source du panache. (a) Concentrations intégrées du SO₂ dans le scénario 2a. (b) Concentrations intégrées du SO₂ dans le scénario 2b. (c) Concentrations intégrées du NO₂ dans le scénario 2b. (d) Plan de répartition des matériaux du sol à travers la scène, avec illustration de la coupe longitudinale utilisée.

calculé l'erreur quadratique moyenne de prédiction du gaz g , définie par la formule suivante [25] :

$$\sigma_{prediction}(ppm \cdot m) = \sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (\hat{q}_g(i) - q_g(i))^2} \quad (4.23)$$

Avec : N_p le nombre de pixels concernés par le calcul. \hat{q}_g est la concentration intégrée du gaz g estimée par l'approche linéaire. Enfin, q_g est la vraie concentration intégrée du gaz g .

Les tableaux 4.12 et 4.13 regroupent les erreurs quadratiques moyennes de prédiction calculées pour nos quatre scénarii. Pour le premier tableau ces erreurs ont été calculées en séparant les pixels selon leurs concentrations intégrées, afin d'illustrer l'impact de la concentration sur la performance de la quantification des gaz.

Les valeurs des erreurs quadratiques corroborent les remarques que nous avons soulignées précédemment. En effet, sur tous nos scénarii l'erreur quadratique est nettement plus élevée pour les fortes concentrations. Le rapport entre les erreurs quadratiques des deux cas de figure est compris entre 8 (NH₃ du scénario 1a) et 155 (SO₂ du scénario 2b).

Pour le deuxième tableau, les erreurs quadratiques ont été calculées pour les pixels appartenant à

$\sigma_{prediction} (ppm \cdot m)$	$q_g < 1000 ppm \cdot m$		$q_g \geq 1000 ppm \cdot m$	
	SO ₂	NH ₃ ou NO ₂	SO ₂	NH ₃ ou NO ₂
scénario 1a	142.31	80.05	2934.40	672.05
scénario 1b	195.00	69.98		
scénario 2a	137.80	791.25	2795.90	
scénario 2b	97.77	1343.80	15162.00	21127.00

TABLE 4.12: Représentation de l'erreur quadratique moyenne de prédiction, calculée en regroupant les pixels selon leur concentrations intégrées : Illustration de l'impact de la concentration sur la performance de la quantification des gaz.

$\sigma_{prediction} (ppm \cdot m)$	Terreaux sablonneux marron		Toiture en aluminium	
	SO ₂	NH ₃ ou NO ₂	SO ₂	NH ₃ ou NO ₂
scénario 1a	566.01	86.12	71.58	11.92
scénario 1b	161.19	67.97	16.49	7.23
scénario 2a	42.68	758.23	2.42	24.31
scénario 2b	1316.50	853.87	28.68	24.06

TABLE 4.13: Représentation de l'erreur quadratique moyenne de prédiction, calculée pour les pixels composés d'un sol en terreaux sablonneux marron ou en aluminium : Illustration de l'impact de l'émissivité du sol sur la performance de la quantification des gaz.

la classe de terreaux sablonneux marron (matériau émissif) et la toiture en aluminium (matériau réfléchissant). Ceci afin d'illustrer l'impact de l'émissivité du sol sur les performances de la quantification des gaz. Ce deuxième tableau montre que les erreurs quadratiques moyennes sont plus faibles

pour les pixels contenant de l'aluminium. Ce qui confirme l'impact de la composition du sol sur les performances de la quantification. Néanmoins les valeurs présentées dans ce tableau sont à prendre avec prudence, parce que les concentrations mises en jeu ne sont pas exactement les mêmes pour les deux types de pixels considérés ici.

Le calcul des erreurs quadratiques moyennes de prédiction a aussi été effectué sur l'ensemble des pixels de chaque scénario. Ces résultats ont été regroupés dans le tableau 4.14 dans le paragraphe suivant.

Étant donné que la méthode CONLIE est basée sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt, la convergence de celle-ci est conditionnée par la qualité de son initialisation. Il faut donc que les estimations initiales des concentrations des gaz ne soient pas très éloignées des vraies valeurs. Il nous a donc semblé utile d'améliorer notre estimation initiale, en introduisant des contraintes spatiales au sein du panache. Dans le dernier paragraphe de ce chapitre nous détaillerons notre démarche pour contraindre notre estimation initiale des concentrations des gaz.

Introduction de contraintes spatiales à l'estimation initiale de la concentration du panache

L'ajout de contraintes spatiales à l'estimation initiale obtenue pour les concentrations des gaz du panache permet d'améliorer les résultats. Le choix des contraintes dépend des connaissances *a priori* que nous avons sur la scène traitée. Concernant nos scènes synthétiques, nous avons considéré que les panaches suivent des distributions gaussiennes. Les paramètres de ces distributions sont supposés connus (position des sources, vitesse et direction du vent, coefficients de dispersion,...). Cette hypothèse n'est pas très contraignante dans le cas général. En effet, il suffit de connaître la classe de stabilité atmosphérique de Pasquill (cf. tableau 2.2) pour déterminer les coefficients de dispersion, grâce aux formules 2.3 et 2.4. Les autres paramètres de la distribution sont directement déduits de la géométrie et de la météo de la scène.

En partant des connaissances *a priori* de la scène nous avons construit un modèle 3D de dispersion gaussienne. Ce dernier est directement donné par l'expression 2.1 en utilisant un débit unitaire. L'intégration selon la verticale de ce modèle permet d'obtenir le modèle de distribution de la concentration intégrée $\mathbf{D_p}$. On suppose alors que les concentrations intégrées des gaz présents sont égales à ce modèle à un facteur multiplicatif près. Ce facteur C_g^{opt} pour le g^{eme} gaz, est déterminé à l'aide d'une régression des moindres carrés. Il correspond à la solution du problème de minimisation suivant :

$$C_g^{opt} = \underset{C}{\operatorname{argmin}} (\mathbf{W} \cdot | \mathbf{q_g} - C \cdot \mathbf{D_p} |) \quad (4.24)$$

Avec : \mathbf{q}_g la concentration intégrée du gaz g estimée précédemment, \mathbf{D}_p est le modèle de distribution unitaire de la concentration intégrée au sein du panache. Enfin, \mathbf{W} correspond aux poids introduits selon les pixels de la scène. En effet, nous avons constaté dans les paragraphes précédents, que l'estimation de la concentration est dépendante de la composition du sol, ainsi qu'à la valeur de la concentration retrouvée. Pour chaque pixel (i, j) de la scène, le coefficient de pondération $\mathbf{W}(i, j)$ dépend à la fois de l'émissivité du sol $\epsilon_{sfc}(i, j)$, et de la valeur de $\mathbf{q}_g(i, j)$. De façon empirique, nous calculons \mathbf{W} selon l'expression suivante :

$$\mathbf{W}(i, j) = \begin{cases} 0.6 & \text{si : } \epsilon_{sfc}(i, j) \sim 0 \text{ et } \exp(-\kappa_g^{max} \cdot \mathbf{q}_g(i, j)) > 0.75 \\ 0.1 & \text{si : } \epsilon_{sfc}(i, j) \sim 0 \text{ et } \exp(-\kappa_g^{max} \cdot \mathbf{q}_g(i, j)) \leq 0.75 \\ 0.25 & \text{si : } \epsilon_{sfc}(i, j) \sim 1 \text{ et } \exp(-\kappa_g^{max} \cdot \mathbf{q}_g(i, j)) > 0.75 \\ 0.05 & \text{si : } \epsilon_{sfc}(i, j) \sim 1 \text{ et } \exp(-\kappa_g^{max} \cdot \mathbf{q}_g(i, j)) \leq 0.75 \end{cases} \quad (4.25)$$

La notation $\epsilon_{sfc}(i, j) \sim 0$ signifie que le matériau composant le sol du pixel (i, j) est un matériau réfléchissant. Son émissivité est en moyenne inférieure à 0.5. De même, la notation $\epsilon_{sfc}(i, j) \sim 1$ est employée pour désigner un matériau émissif. La valeur moyenne de l'émissivité est supérieure à 0.5. La valeur 0.75 correspond à une concentration d'environ $1000 \text{ ppm} \cdot m$ pour le cas du SO_2 .

Dans le cas des scènes contenant plusieurs sources d'émission, tel que le scénario 1b de la raffinerie, nous utilisons une régression des moindres-carrés multiple. Auquel cas, nous cherchons à déterminer un vecteur de facteurs $\mathbf{C}_g^{\text{opt}}(i)$, où chaque terme correspond à une des sources d'émission de la scène. Le terme $C \cdot \mathbf{D}_p$ dans l'équation 4.24 devient alors : $\sum_i C(i) \cdot \mathbf{D}_{p,i}$, où $\mathbf{D}_{p,i}$ est la distribution unitaire correspondante à la i^{eme} source.

Sur les figures 4.32 et 4.33 nous avons représenté les concentrations obtenues après application des contraintes spatiales sur les quantifications de la partie précédente.

Nous constatons sur ces figures que l'introduction des contraintes spatiales améliore considérablement notre estimation des concentrations. Les nouvelles concentrations intégrées sont suffisamment proches des vraies concentrations, pour assurer une bonne convergence de l'algorithme itératif.

Par ailleurs, nous avons quantifié dans le tableau 4.14 l'apport des contraintes spatiales à la quantification des panaches. Ce tableau regroupe les erreurs quadratiques moyennes de prédiction, calculées sur l'ensemble des pixels de chaque scène.

Nous pouvons constater sur ce tableau, que pour tous les scénarii étudiés, l'erreur quadratique est réduite d'au moins d'un facteur 2 après utilisation des contraintes spatiales. Dans le cas du SO_2 du scénario 1a, on passe d'une erreur de $639.0 \text{ ppm} \cdot m$ à seulement $287.92 \text{ ppm} \cdot m$. La raison réside dans la proportion importante de pixels émissifs dans cette scène, où la concentration est mal estimée. Cependant, l'introduction d'un poids ($\mathbf{W}(i, j)$), donnant plus d'importance aux pixels réfléchissants, permet de réduire considérablement les erreurs d'estimation.

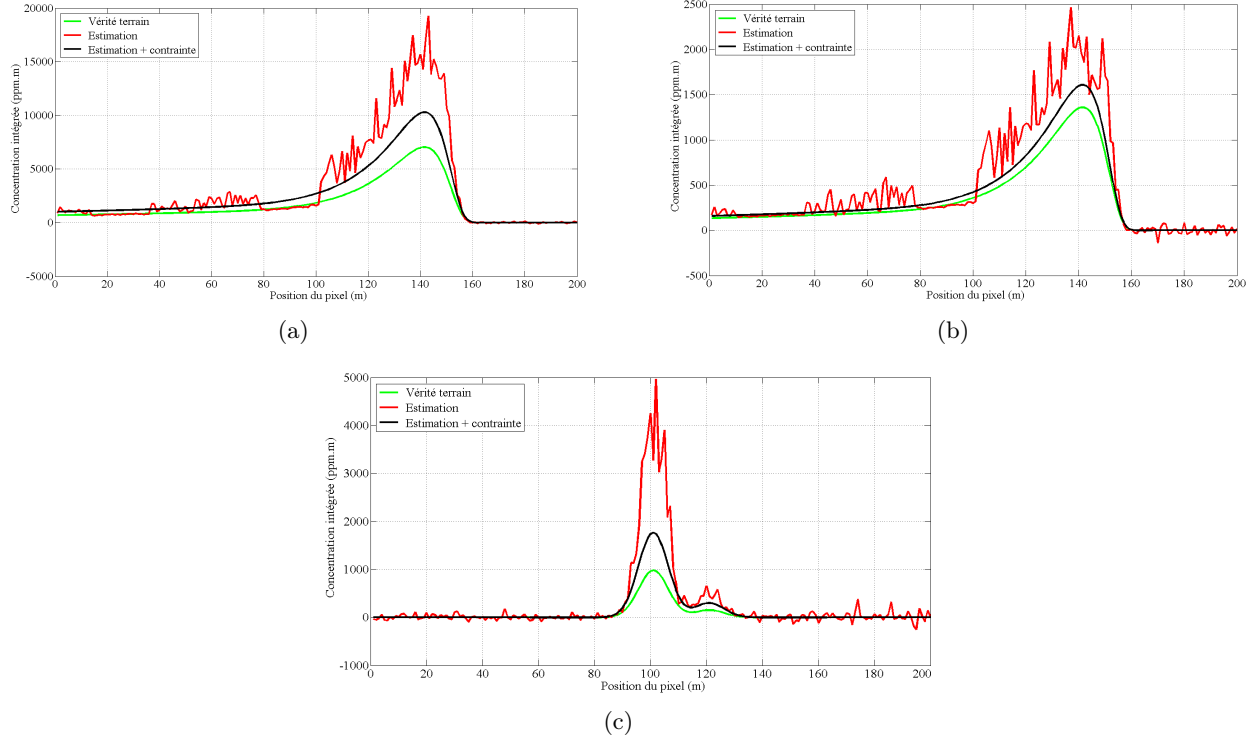


FIGURE 4.32 – Amélioration de l’estimation par approche linéaire des concentrations intégrées des gaz de la raffinerie, par application de contraintes spatiales. (a) Concentrations intégrées du SO_2 dans le scénario 1a (coupe longitudinale). (b) Concentrations intégrées du NH_3 dans le scénario 1a (coupe longitudinale). (c) Concentrations intégrées du SO_2 dans le scénario 1b (coupe transversale).

$\sigma_{\text{prediction}} \text{ (ppm} \cdot \text{m)}$	Quantification linéaire		Quantification linéaire + contraintes	
	SO_2	NH_3 ou NO_2	SO_2	NH_3 ou NO_2
scénario 1a	639.00	88.69	287.92	22.08
scénario 1b	195.00	69.98	73.02	34.11
scénario 2a	144.70	791.25	70.76	486.43
scénario 2b	8139.50	8098.60	3510.80	229.82

TABLE 4.14: Représentation de l’erreur quadratique moyenne de prédiction : Illustration de l’apport de l’ajout de contraintes spatiales à la quantification des gaz.

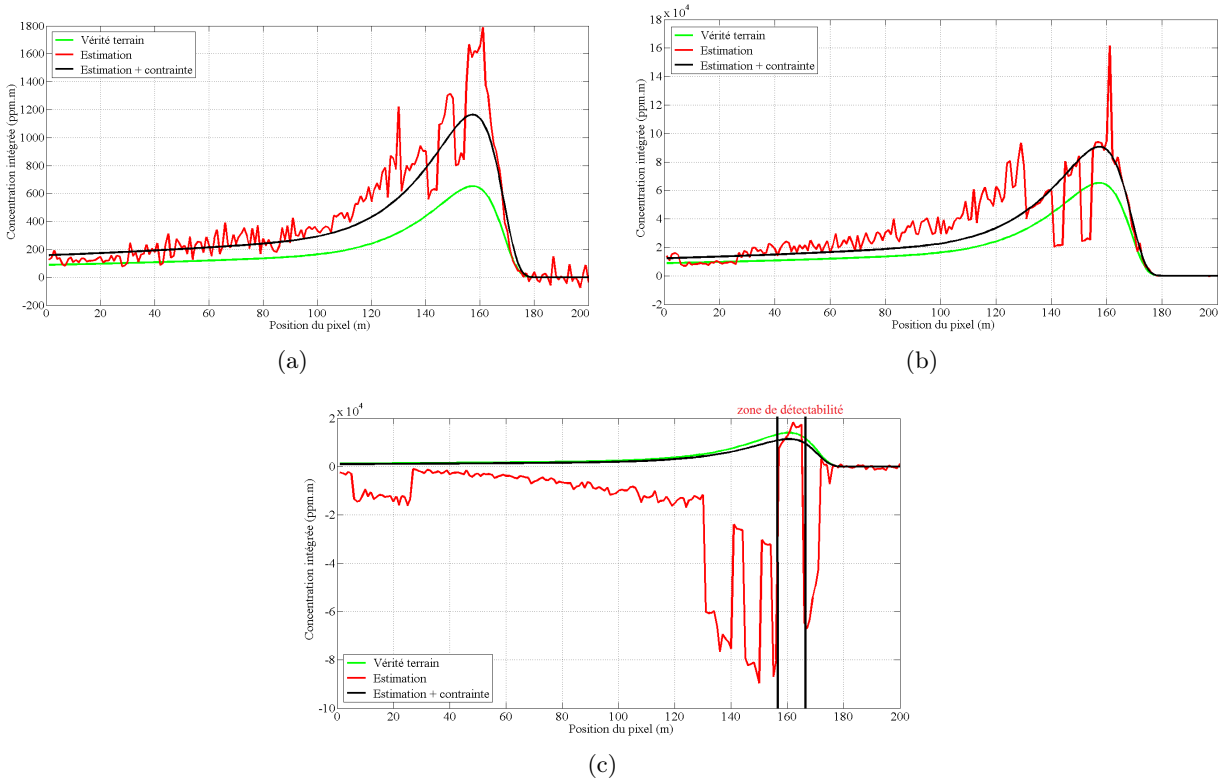


FIGURE 4.33 – Amélioration de l'estimation par approche linéaire des concentrations intégrées des gaz de la cimenterie, par application de contraintes spatiales. (a) Concentrations intégrées du SO₂ dans le scénario 2a (coupe longitudinale). (b) Concentrations intégrées du SO₂ dans le scénario 2b (coupe longitudinale). (c) Concentrations intégrées du NO₂ dans le scénario 2b (coupe longitudinale).

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter les différentes étapes de notre approche 3D de quantification des panaches industriels. Cette approche vise tout d'abord à déterminer tous les paramètres de la scène, qui ne sont pas directement liés au panache : luminance de fond, paramètres de l'atmosphère et paramètres du sol. Une fois ces étapes réalisées, un modèle non-linéaire 3D du panache est utilisé lors d'une optimisation itérative permettant de remonter aux paramètres du panache (températures et concentrations). Cette optimisation nécessite une initialisation, que nous construisons à partir d'une quantification linéaire mono-couche du panache.

Dans un second temps, nous avons présenté les résultats et les performances des différentes étapes prises séparément. Pour la bande LWIR, toutes les étapes ont été étudiées. En revanche en bande MWIR, les travaux portant sur l'estimation des paramètres du sol et sur l'initialisation de CONLIE n'ont pas pu être menées jusqu'au bout. Ils feront l'objet des perspectives de cette thèse. Tout d'abord, nous avons montré que l'algorithme de détection utilisé permet de détecter plus de 70 % des pixels du panache, sur la quasi totalité des scénarii étudiés.

Ensuite, l'analyse des classifications réalisées sous et hors panache, montre que leurs performances sont assez hétérogènes. Pour certains scénarii, on obtient de bonnes classifications où le coefficient de kappa dépasse la valeur de 0.61. En revanche, pour les deux scénarii de la cimenterie en bande MWIR, les coefficients de kappa obtenus indiquent de mauvaises classifications.

Concernant l'estimation de la luminance de fond, nous avons mis en place une nouvelle approche couplant la méthode Selected-Band avec les classifications de la scène (sous et hors panache). Cette nouvelle approche permet de gérer les scènes hétérogènes, tout en prenant en compte la variabilité intra-classe. Il faut noter tout de même, qu'une mauvaise classification de la scène impactera directement les performances de l'estimation de L_{off} .

En outre, nous avons illustré les résultats du TES réalisé sur nos scènes en bande LWIR. Nous avons remarqué que l'estimation de la température du sol est moins performante pour les matériaux à faibles émissivités (cuivre et aluminium). Pour le cuivre l'écart-type sur la température du sol estimée à partir des vraies luminances de fond atteint 4.10 K . Alors qu'il ne dépasse pas 0.63 K pour les matériaux plus émissifs. En ce qui concerne l'estimation des émissivités du sol, nous avons constaté une augmentation des écarts-types de certains matériaux, lorsqu'on utilise les luminances de fond estimées. Ces matériaux sont ceux qui ont été mal-classifiés, et par conséquent leurs luminances de fond ont été mal-estimées.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre portait sur l'initialisation de CONLIE. Nous avons comparé, dans un premier temps, les trois méthodes d'estimation de la température du panache que nous avons introduites. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux performances de l'estimation linéaire des concentrations de gaz. Nous avons montré que plus la concentration des gaz est importantes et moins l'estimation est performante. Ainsi, pour le scénario 1a l'erreur quadratique moyenne de prédiction du SO_2 est de $142.31 \text{ ppm} \cdot m$ pour les pixels où la concentration est inférieure à $1000 \text{ ppm} \cdot m$. Cette erreur passe à $2934.40 \text{ ppm} \cdot m$ lorsque les concentrations des pixels dépassent $1000 \text{ ppm} \cdot m$.

Par ailleurs, nous avons mis en évidence la variation de la performance de l'estimation des concentrations en fonction de la composition du sol : les performances de cette dernière sont meilleures pour les pixels réfléchissants.

Afin d'améliorer l'initialisation de CONLIE, nous avons introduit des contraintes spatiales sur la concentration. Ces contraintes intègrent une pondération permettant de tenir compte des constats ci-dessus, et diminuent d'un facteur 2 les erreurs quadratiques moyennes de prédiction.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier les performances de notre processus global de quantification de panache. Puis nous montrerons les résultats que nous avons obtenus en appliquant ce dernier à des images réelles, acquises dans la bande LWIR, par l'instrument HyperCam-LW de Telops.

Chapitre 5

Application de la méthode CONLIE sur différentes scènes industrielles

Sommaire

5.1	Introduction	185
5.2	Performances de la méthode CONLIE sur des données synthétiques	185
5.2.1	Initialisation de la température du panache	186
5.2.2	Analyse de la convergence de la méthode CONLIE	187
5.2.3	Analyse des performances d'estimation par la méthode CONLIE	192
5.3	Application de la méthode CONLIE sur des images réelles	199
5.3.1	Présentation des données	199
5.3.2	Traitements préliminaires	200
5.3.3	Résultats de la méthode CONLIE	205
5.4	Conclusion	210

5.1 Introduction

Le chapitre précédent était consacré à la présentation de la méthode CONLIE, et des différentes étapes préliminaires à l'application de celle-ci. Nous avons, en outre, réalisé une étude de sensibilité de chacune de ces étapes intermédiaires afin de les valider.

Dans le présent chapitre, nous allons nous intéresser à la validation globale de la méthode CONLIE, en analysant ses performances sur des scènes synthétiques.

Dans un second temps, nous appliquerons notre méthode à des jeux de données réelles, acquis par l'instrument HyperCam-LW de Telops en bande LWIR.

5.2 Performances de la méthode CONLIE sur des données synthétiques

Cette partie est consacrée à l'application de la méthode CONLIE sur nos scènes synthétiques. Nous allons tout d'abord, expliquer la méthode utilisée pour initialiser la température au sein du

panache. Ensuite, nous étudierons la convergence de la méthode CONLIE sur quelques pixels de nos scènes synthétiques. Enfin, nous analyserons les performances d'estimation par la méthode CONLIE, à travers nos données synthétiques.

5.2.1 Initialisation de la température du panache

Dans le chapitre précédent nous avons détaillé l'initialisation de la concentration des différents gaz du panache. En revanche, en ce qui concerne la température du panache, nous n'avons pas explicité entièrement notre démarche. En effet, les méthodes d'estimation de température que nous avons présentées, ne fournissent qu'une température équivalente issue d'une modélisation mono-couche. Or le passage d'une modélisation mono-couche de la température du panache à une modélisation multi-couches, n'est pas linéaire en température, du fait de la loi corps noir. Ceci est d'autant plus vrai pour les fortes températures du panache.

Pour contourner cette difficulté, nous avons adopté l'approche suivante : pour chaque pixel, la distribution verticale de la température est supposée connue à une constante près, puisque l'écart de température panache/air ambiant suit la même distribution que la concentration. Il suffit alors de connaître l'écart de température maximal sur chaque profil vertical (ΔT_{max}).

Dans le cas d'un panache plus chaud que l'air ambiant, la température maximale est toujours plus importante que la température équivalente retrouvée pour une modélisation mono-couche. De plus, si on exclut les cas d'accidents industriels, l'écart de température panache/air ambiant ne dépassera pas les 500 K. En partant de ces deux constatations, nous avons cherché la valeur du ΔT_{max} optimale pour l'initialisation (ΔT_i) entre la valeur issue de l'estimation mono-couche (ΔT_e) et $\Delta T_e + 500$ K.

Pour déterminer ΔT_i , nous avons réalisé 10 simulations MODTRAN avec différents profils d'écart de température (cf. figure 5.1-(a)). Le choix d'un pas de 50 K pour parcourir l'intervalle $[\Delta T_e ; \Delta T_e + 500 \text{ K}]$, nous a semblé judicieux, puisqu'il permet de limiter le nombre de simulations à réaliser. Lors de ces simulations, les concentrations des gaz seront prises aux valeurs retrouvées précédemment lors de leur initialisation.

À la fin de chaque simulation, la luminance calculée $\mathbf{F}(\theta)$ est comparée à la luminance mesurée par le capteur \mathbf{M} , en utilisant la norme $|\mathbf{M} - \mathbf{F}(\theta)| = (\mathbf{M} - \mathbf{F}(\theta))^T (\mathbf{M} - \mathbf{F}(\theta))$. Le profil d'écart de température qui permet d'obtenir la luminance $\mathbf{F}(\theta)$ la plus proche de la luminance mesurée sera sélectionné pour initialiser CONLIE sur le pixel considéré. Cette méthode s'approche de la méthode de *Turcotte et al.* [22] mentionnée précédemment.

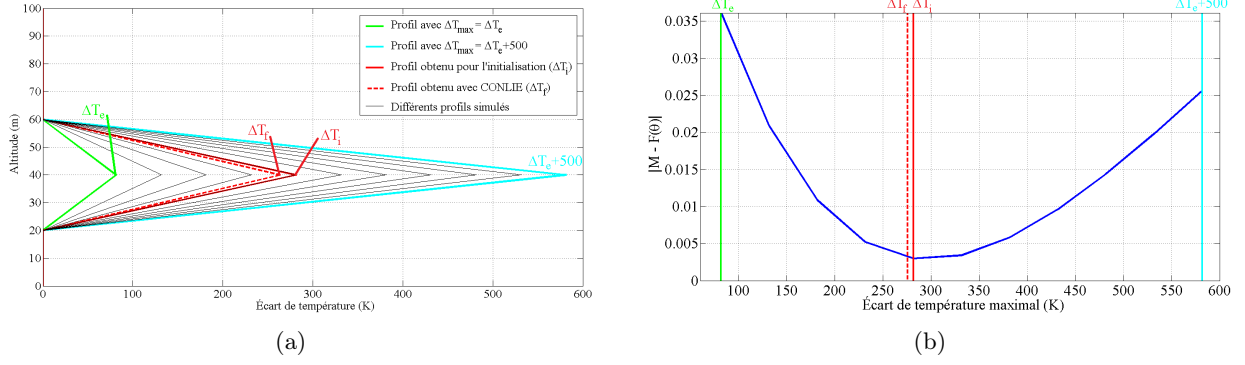


FIGURE 5.1 – Illustration de l’initialisation de la température du panache pour un pixel de la raffinerie (scénario 1a). (a) Différents profils d’écart de température panache/air ambiant utilisés, simulés lors de l’initialisation. (b) Courbe de la mesure d’écart entre la luminance mesurée (\mathbf{M}) et la luminance simulée ($\mathbf{F}(\theta)$) en utilisant les différents profils d’écart de température.

Sur la figure 5.1-(b) nous avons représenté pour un pixel de la raffinerie (scénario 1a), la norme $\|\mathbf{M} - \mathbf{F}(\theta)\|$ calculée pour les différentes simulations réalisées. Sur cette figure, l’écart de température maximal du profil optimal obtenu pour l’initialisation est égal à $\Delta T_i = 281.73 \text{ K}$, pour un ΔT_{max} de 81.73 K obtenu avec le modèle mono-couche. Sur la figure 5.1, nous indiquons aussi, pour information, la valeur de l’écart de température maximal du profil obtenu après convergence de CONLIE, qui est de $\Delta T_f = 275.7 \text{ K}$. La vérité terrain de ce pixel, nous donne un écart maximal de températures sur le profil vertical de 270.1 K . Ce qui montre bien la nécessité d’adapter le ΔT mono-couche, pour rapprocher l’initial à la valeur vraie, et le gain apporté par la convergence de CONLIE sur l’estimation de la température du panache. De plus, l’avantage de cette approche réside dans la cohérence, qu’elle permet d’obtenir, entre les concentrations des gaz et la température du panache.

Dans la prochaine section de ce chapitre, nous présenterons une analyse détaillée des résultats de la convergence de CONLIE, pour l’ensemble des paramètres inversés.

5.2.2 Analyse de la convergence de la méthode CONLIE

Dans cette section, nous allons illustrer la convergence de la méthode CONLIE sur deux pixels différents, issus du scénario 1a de la raffinerie. La position de ces deux derniers est indiquée sur la figure 5.2. Pour ces deux pixels, la convergence de CONLIE survient après 3 (pixel 1) et 2 (pixel 2) itérations. Lors de notre implémentation de l’algorithme Levenberg-Marquardt, nous avons imposé un nombre maximal d’itérations égal à 10. Cette contrainte vise à réduire le temps de calcul. Pour la plupart des pixels, la convergence est observée avant les 10 itérations autorisées. Même pour les quelques pixels, qui ne convergent pas après ces itérations, on constate que les concentrations obtenues à la fin ne sont pas très éloignées de celles obtenues après 10 itérations.

Nous avons aussi fixé initialement le facteur d’amortissement λ_d (cf. équation 4.7) à 0.1. Lors de

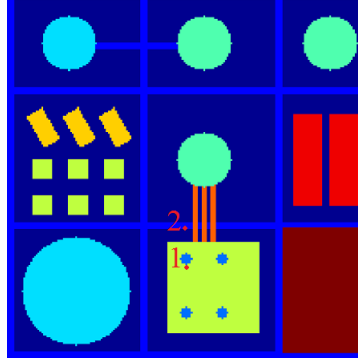


FIGURE 5.2 – Positions sur le plan de la raffinerie, des pixels sélectionnés pour l'étude de la convergence.

chaque itération, ce facteur est divisé par 10^3 si les paramètres obtenus permettent d'avoir une valeur plus faible de la fonction coût. Dans le cas contraire, ce facteur sera multiplié par 10^3 . Ce choix est entièrement empirique, mais il nous a permis une convergence rapide. Il est adapté à notre cas, parce que l'initialisation des paramètres est suffisamment proche des valeurs recherchées.

Par ailleurs, pour simplifier la procédure itérative, nous avons considéré que les paramètres du panache (concentrations et températures pour chaque couche du profil vertical) peuvent être substitués par leurs valeurs maximales sur le profil vertical. Cette simplification se justifie par la connaissance *a priori* de la distribution spatiale et verticale du panache. Le temps de calcul est alors considérablement réduit, en raison de la réduction de la taille de la matrice Jacobienne utilisée dans l'équation itérative 4.7.

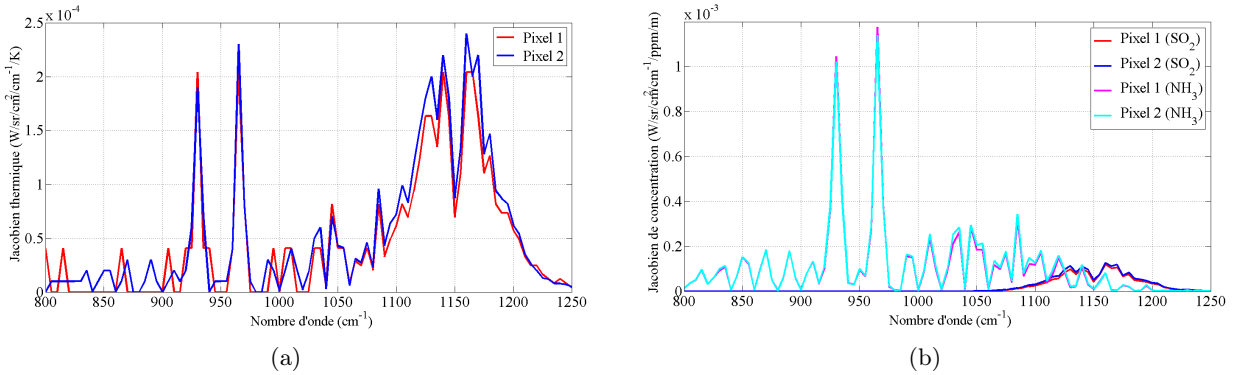


FIGURE 5.3 – Jacobiens calculés pour les deux pixels étudiés, pour les paramètres initiaux. (a) Jacobien selon l'écart de température panache/air maximal du profil vertical. (b) Jacobiens selon les concentrations maximales des gaz du panache (SO_2 et NH_3) sur le profil vertical.

Ainsi à chaque itération, seules trois dérivées du signal en entrée capteur sont calculées : dérivée par rapport à l'écart de température panache/air maximal du profil vertical, et dérivées par rapport aux concentrations maximales des gaz du panache (SO_2 et NH_3) sur le profil vertical. Sur la figure

5.3, nous avons illustré ces trois composantes de la Jacobienne pour les deux pixels étudiés. Le calcul effectué ici correspond aux paramètres initiaux.

La figure 5.3 montre que les paramètres du panache ont des impacts très différents sur le signal en entrée du capteur. Une augmentation de la concentration d'un gaz impactera uniquement les bandes d'absorption de celui-ci, tandis qu'une variation de la température du panache modifiera le signal pour toutes les bandes d'absorption des gaz présents dans la scène (gaz atmosphérique et gaz du panache).

L'amplitude des Jacobiens de concentration dépend essentiellement de l'amplitude de l'absorbance du gaz en question. En revanche, le Jacobien thermique dépend non seulement de l'amplitude de l'absorbance, mais aussi des concentrations des gaz dans le profil. C'est ainsi que sur la figure 5.3-(a), le SO_2 a le même impact que le NH_3 , qui pourtant a une absorbance beaucoup plus importante.

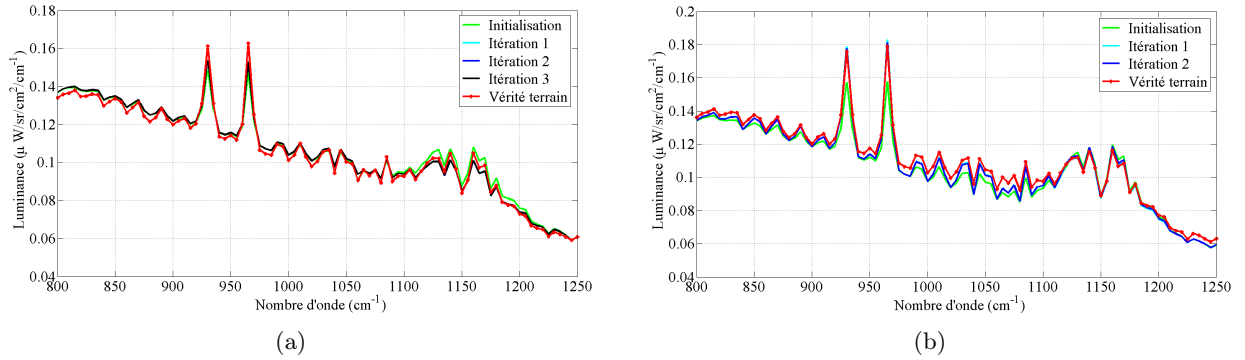


FIGURE 5.4 – Illustration de la convergence de CONLIE en terme de luminance en entrée de capteur. Les courbes vertes correspondent à l'initialisation, les courbes rouges représentent les luminances « mesurées ». (a) Convergence pour le pixel 1. (b) Convergence pour le pixel 2.

Pour analyser la convergence de la méthode CONLIE sur les deux pixels choisis, nous nous sommes tout d'abord intéressés à la comparaison des luminances obtenues après chaque itération. Sur la figure 5.4 sont représentées les luminances obtenues pour les différentes itérations. Les courbes vertes représentent les luminances calculées avec les paramètres d'initialisation ($\mathbf{F}(\theta_0)$) ; tandis que les courbes rouges représentent les luminances « mesurées » en entrée de capteur (\mathbf{M}). Les autres courbes sont les luminances obtenues aux différents itérations de CONLIE ($\mathbf{F}(\theta_i)$).

Nous constatons sur la figure 5.4 que les luminances initiales ne sont pas très éloignées des valeurs mesurées. Ce qui valide notre initialisation, notamment de la température du panache présentée dans la section précédente.

À la fin du processus itératif, on remarque que pour les bandes d'absorption des gaz du panache (SO_2 et NH_3), la luminance obtenue $\mathbf{F}(\theta_f)$ est systématiquement plus proche de la mesure (\mathbf{M}) que la

luminance $\mathbf{F}(\theta_0)$. Cependant, en dehors de ces bandes CONLIE n'assure pas toujours une réduction de l'écart avec la luminance mesurée, comme nous pouvons le voir pour le pixel 1 (cf. figure 5.4-(a)). Par ailleurs, nous pouvons noter que la convergence de CONLIE n'est pas identique pour les deux pixels. Pour le pixel 2, la luminance calculée pour la dernière itération coïncide bien avec la luminance \mathbf{M} sur les bandes d'absorption du SO_2 et du NH_3 . Par contre, CONLIE ne permet pas d'avoir d'aussi bons résultats sur le pixel 1.

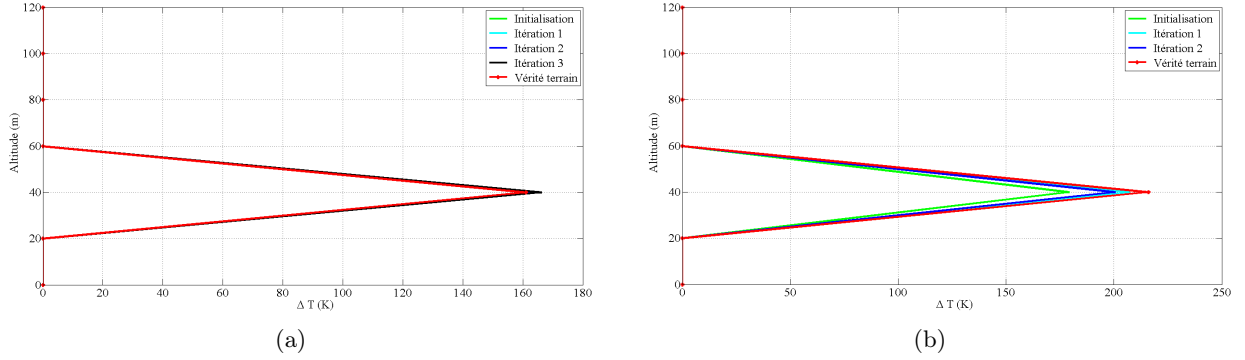


FIGURE 5.5 – Illustration de la convergence de CONLIE en terme du profil vertical de l'écart de température panache/air. Les courbes vertes correspondent à l'initialisation, les courbes rouges représentent la vérité terrain. (a) Convergence pour le pixel 1. (b) Convergence pour le pixel 2.

En dehors des bandes d'absorption des gaz du panache, la convergence de la luminance est directement dictée par la convergence de la température du panache ; puisque la température est le seul paramètre du panache qui a un impact sur la luminance dans cette zone du spectre. Les écarts observés entre les luminances $\mathbf{F}(\theta_f)$ et les luminances mesurées sont donc dus d'une part à l'erreur sur l'estimation de la température du panache. Ils sont dus, d'autre part, aux erreurs d'estimations des paramètres du sol (calculs TES : cf. § 4.3.5). En conséquence, même si la température du panache est estimée avec exactitude, on continuera à observer ces écarts de luminance.

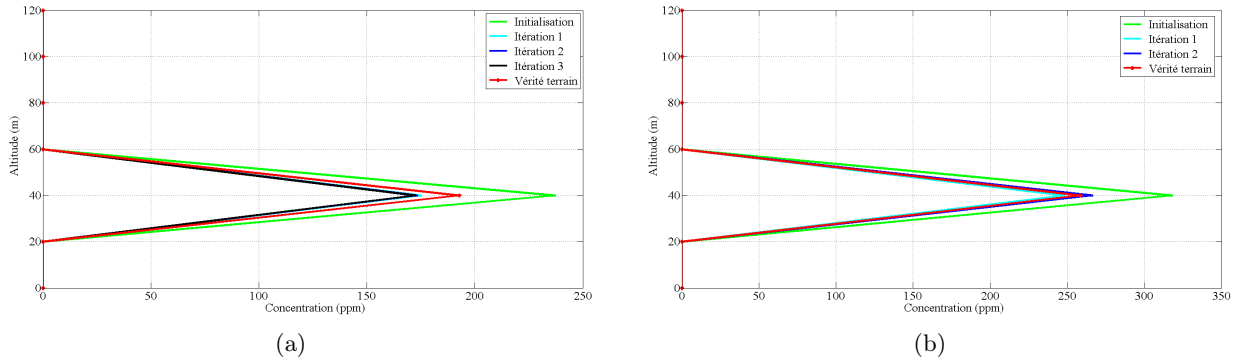


FIGURE 5.6 – Illustration de la convergence de CONLIE en terme du profil vertical de la concentration du SO_2 . Les courbes vertes correspondent à l'initialisation, les courbes rouges représentent la vérité terrain. (a) Convergence pour le pixel 1. (b) Convergence pour le pixel 2.

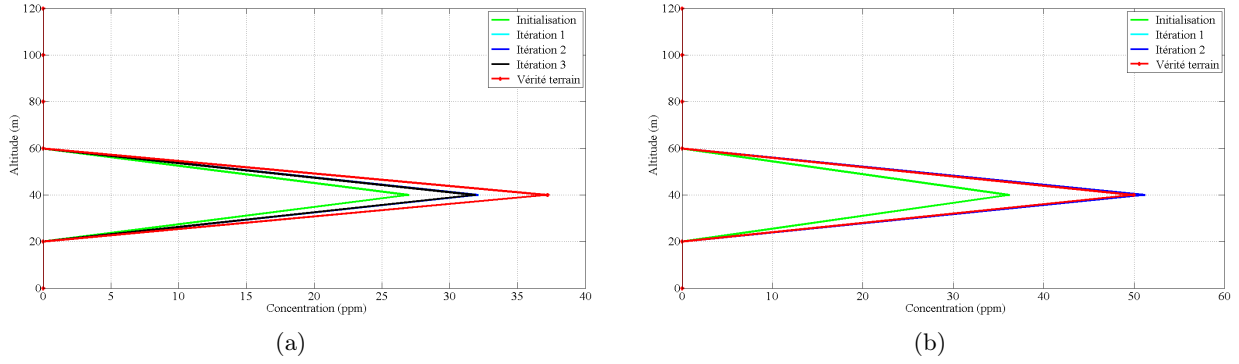


FIGURE 5.7 – Illustration de la convergence de CONLIE en terme du profil vertical de la concentration du NH_3 . Les courbes vertes correspondent à l’initialisation, les courbes rouges représentent la vérité terrain. (a) Convergence pour le pixel 1. (b) Convergence pour le pixel 2.

Les figures 5.5, 5.6 et 5.7 illustrent respectivement les profils d’écart de température panache/air, de la concentration du SO_2 et du NH_3 pour les deux pixels étudiés.

Pour le pixel 1, le profil initial de la température est très proche du profil recherché : on a seulement 5.3 K d’écart entre les températures maximales des profils. Par ailleurs, la concentration maximale du SO_2 sur le profil est surestimée de 44.5 ppm. Celle du NH_3 est sous-estimée de 10.2 ppm.

Après convergence, l’écart sur la concentration du SO_2 est réduit à 20.1 ppm ; tandis que celui de la concentration du NH_3 passe à 5.3 ppm. Cette fois-ci, les concentrations des deux gaz sont en sous-estimation. Alors que l’erreur d’estimation pour les concentrations est réduite de moitié, l’estimation de la température du panache n’est améliorée que de 0.1 K.

Pour le deuxième pixel, l’amélioration de l’estimation par la méthode CONLIE est plus remarquable. En effet, l’erreur initiale sur la température du panache est de 36.7 K, elle passe à 15.4 K à la fin du processus itératif. De même, les erreurs sur l’estimation des concentrations maximales sont initialement égales à 59.7 ppm et 13.7 ppm, respectivement pour le SO_2 et le NH_3 . Ces erreurs sont alors réduites après convergence à 7.7 ppm et 1.3 ppm.

L’analyse de la convergence que nous venons de présenter ci-dessus permet de souligner deux points importants. D’abord, nous remarquons que les erreurs d’estimations obtenues après convergence peuvent varier beaucoup d’un pixel à un autre. D’autre part, les erreurs d’estimation de la luminance du fond et des paramètres du sol semblent constituer des limitations à la convergence de CONLIE, comme nous pouvons le voir sur la figure 5.4. Afin d’approfondir notre analyse, nous nous intéresserons dans la prochaine section aux performances de l’estimation par la méthode CONLIE sur tout le panache. De surcroît, nous détaillerons l’impact des erreurs d’estimation de la luminance du fond et des paramètres du sol sur l’estimation des paramètres du panache.

5.2.3 Analyse des performances d'estimation par la méthode CONLIE

Après avoir étudié la convergence de la méthode CONLIE sur deux pixels issus de nos données synthétiques, nous allons à présent analyser les performances globales de cette méthode sur plusieurs scènes synthétiques. Les scènes utilisées dans cette section sont le scénario 1a de la raffinerie et les deux scénarii 2a et 2b de la cimenterie. Le scénario 1b de la raffinerie n'a pas encore été traité, car notre implémentation actuelle de CONLIE suppose que tous les gaz suivent la même distribution spatiale de concentration. Ce qui n'est pas le cas de ce scénario multi-sources. L'adaptation de notre méthode à ce cas de figure fait partie de nos perspectives à court-terme. Sur les figures 5.8, 5.9

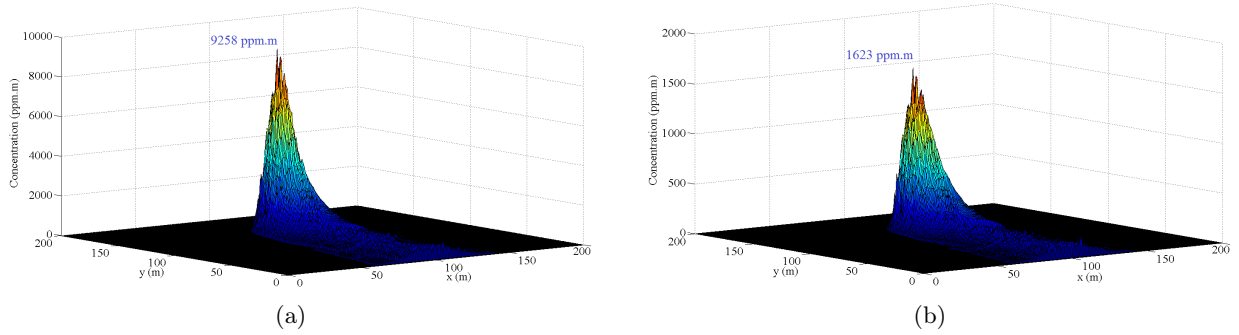


FIGURE 5.8 – Résultats de l'estimation avec la méthode CONLIE des concentrations intégrées des gaz de la raffinerie. (a) Concentration estimée pour le SO_2 (scénario 1a). (b) Concentration estimée pour le NH_3 (scénario 1a).

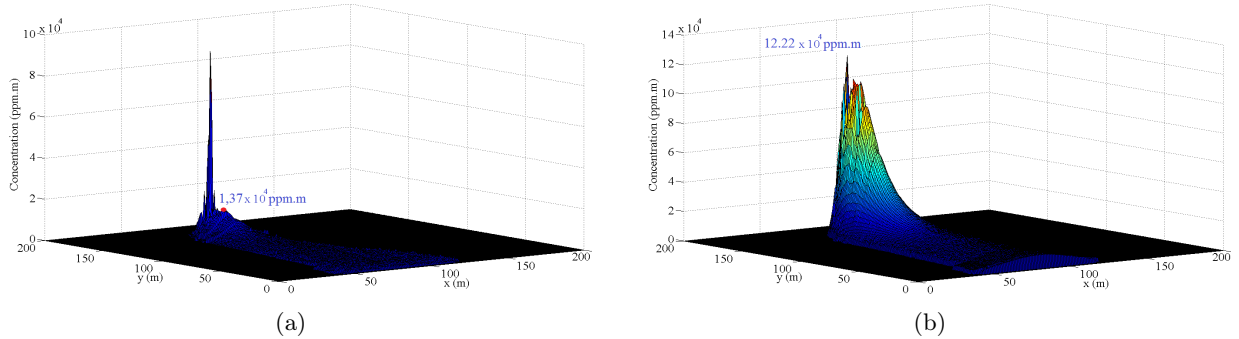


FIGURE 5.9 – Résultats de l'estimation avec la méthode CONLIE des concentrations intégrées des gaz de la cimenterie. (a) Concentration estimée pour le NO_2 (scénario 2b). (b) Concentration estimée pour le SO_2 (scénario 2b).

et 5.10 nous avons illustré les concentrations intégrées estimées par la méthode CONLIE, pour les principaux gaz des scènes synthétiques. La première figure correspond au cas du scénario 1a de la raffinerie, nous y avons représenté les concentrations retrouvées pour le SO_2 et le NH_3 . La figure 5.9 représente les concentrations du NO_2 et du SO_2 retrouvées pour le scénario 2b. Alors que pour la troisième figure, le SO_2 a été considéré comme le seul gaz des panaches 2a et 2b.

Nous pouvons remarquer sur ces trois figures, que la quantification utilisant la méthode CONLIE

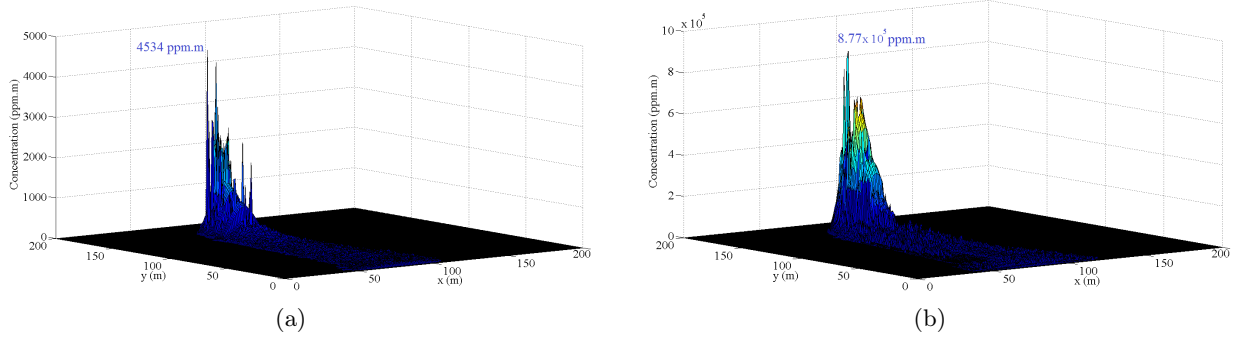


FIGURE 5.10 – Résultats de l'estimation avec la méthode CONLIE des concentrations intégrées des gaz de la cimenterie. Ici nous considérons que les panaches de la cimenterie ne contiennent que du SO₂. (a) Concentration estimée du SO₂ (scénario 2a). (b) Concentration estimée du SO₂ (scénario 2b).

est très peu dépendante de l'hétérogénéité du sol. Le seul impact de la composition du sol sur les performances de CONLIE, réside dans les erreurs d'estimation des paramètres du sol, qui peuvent se propager lors de l'utilisation du modèle du transfert radiatif.

Pour illustrer l'apport de notre approche de quantification de gaz par rapport à la méthode OLS, nous avons tracer sur les figures 5.11, 5.12 et 5.13 les concentrations intégrées obtenues par ces deux méthodes sur des coupes longitudinales le long de nos scènes synthétiques. Sur ces mêmes figures nous avons aussi représenté les vraies concentrations utilisées lors de la génération des images ; ainsi que les concentrations utilisées pour initialiser le processus itératif. Ces concentrations sont obtenues en introduisant des contraintes spatiales pondérées sur l'estimation de la méthode OLS. Notons que pour des raisons pratiques nous avons choisi d'illustrer systématiquement les résultats de l'approche linéaire obtenus en connaissant les paramètres du fond (luminance de fond et paramètres du sol). De même, pour les scénarii de la cimenterie nous avons privilégié l'illustration des résultats de l'application de notre approche en utilisant les vrais paramètres du fond. L'impact de l'utilisation de cette connaissance *a priori* sur les performances de CONLIE sera discuté à la fin de cette section.

La figure 5.11 montre que dans le cas du scénario 1a de la raffinerie, la méthode CONLIE permet de réduire considérablement les erreurs d'estimation. On passe de 70 % d'erreurs, en moyenne, sur l'estimation du SO₂ avec l'approche linéaire - dans le cas le plus favorable, où les paramètres du fond sont connus - à 20 % d'erreurs avec la méthode CONLIE - dans le cas le plus défavorable, où les paramètres du fond sont inconnus.

Par ailleurs, sur la figure 5.12, où nous avons quantifié conjointement le SO₂ et le NO₂ présents dans le panache 2b de la cimenterie, nous remarquons que la méthode CONLIE permet de retourner des concentrations très proches de la vérité terrain sur une grande partie de la coupe longitudinale.

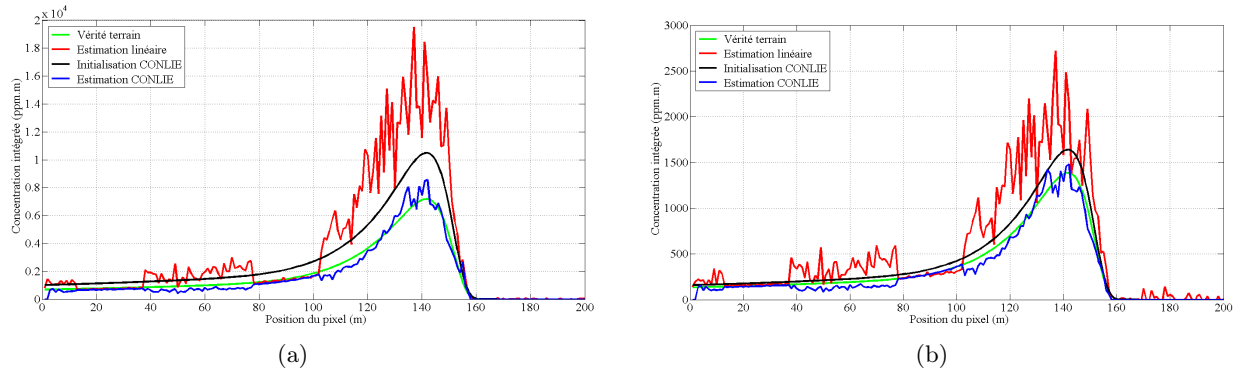


FIGURE 5.11 – Comparaison des résultats des différentes approches d'estimation des concentrations intégrées des gaz de la raffinerie, avec les vraies concentrations. Cette comparaison a été effectuée sur une coupe longitudinale de la scène incluant la source du panache. (a) Concentrations intégrées du SO_2 (scénario 1a). (b) Concentrations intégrées du NH_3 (scénario 1a).

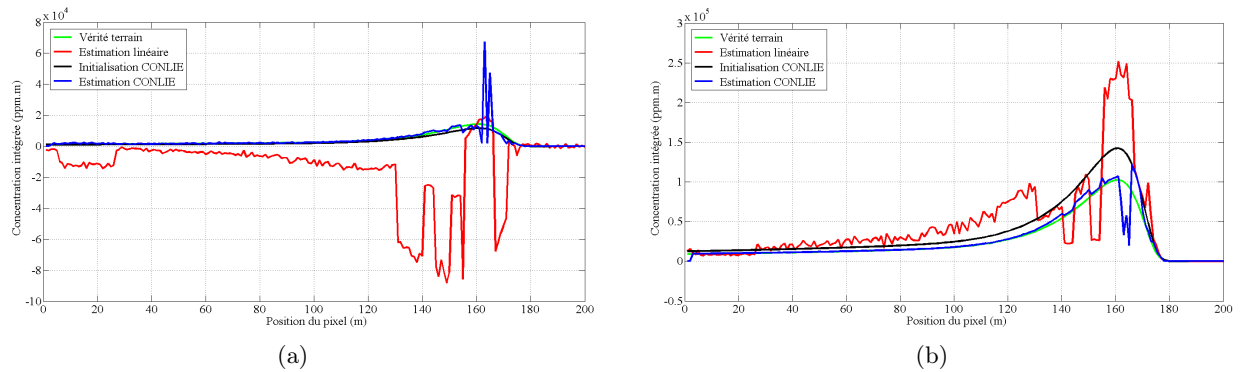


FIGURE 5.12 – Comparaison des résultats des différentes approches d'estimation des concentrations intégrées des gaz de la cimenterie, avec les vraies concentrations. Cette comparaison a été effectuée sur une coupe longitudinale de la scène incluant la source du panache. (a) Concentrations intégrées du NO_2 (scénario 2b). (b) Concentrations intégrées du SO_2 (scénario 2b).

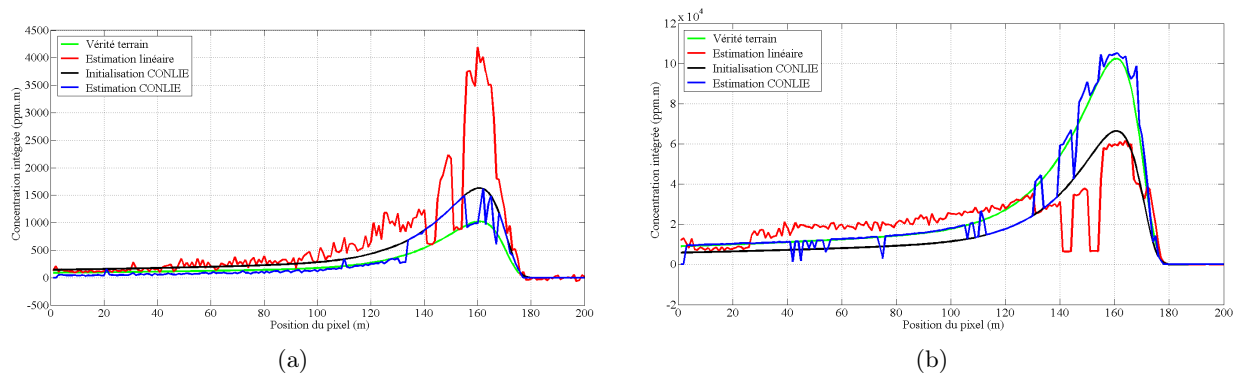


FIGURE 5.13 – Comparaison des résultats des différentes approches d'estimation des concentrations intégrées des gaz de la cimenterie, avec les vraies concentrations. Cette comparaison a été effectuée sur une coupe longitudinale de la scène incluant la source du panache. Ici nous considérons que les panaches de la cimenterie ne contiennent que du SO_2 (a) Concentrations intégrées du SO_2 (scénario 2a). (b) Concentrations intégrées du SO_2 (scénario 2b).

En revanche, au voisinage de la source le NO_2 est très fortement sur-estimé. Ce qui s'accompagne d'une sous-estimation de la concentration du SO_2 . Ces erreurs d'estimation à proximité de la cheminée, trouvent leur origine dans une mauvaise initialisation de la température du panache. En effet, pour ce scénario 2b l'écart de température panache/air ambiant atteint au voisinage de la source 1000 K (cas d'un accident industriel). Or, lors de l'initialisation de l'écart de température notre implémentation ne permet pas de se rapprocher de cette valeur : l'écart de température maximal évalué est de $\Delta T_e + 500\text{ K}$, où ΔT_e est l'écart de température maximal équivalent obtenu avec l'approche linéaire. Dans le cas du scénario 2b, ΔT_e vaut 315.4 K . Ce qui induit à une erreur d'environ 200 K lors de l'initialisation de la température du panache pour ce cas de figure.

D'un point de vue global, l'estimation de CONLIE reste plus performante que celle obtenue par l'approche linéaire.

La figure 5.13 illustre le cas d'estimation du SO_2 dans les scénarii de la cimenterie, en considérant que c'est le seul polluant présent dans le panache. Cette figure montre que pour la plupart des pixels la concentration estimée par CONLIE est très proche de la vraie concentration du SO_2 . Il existe

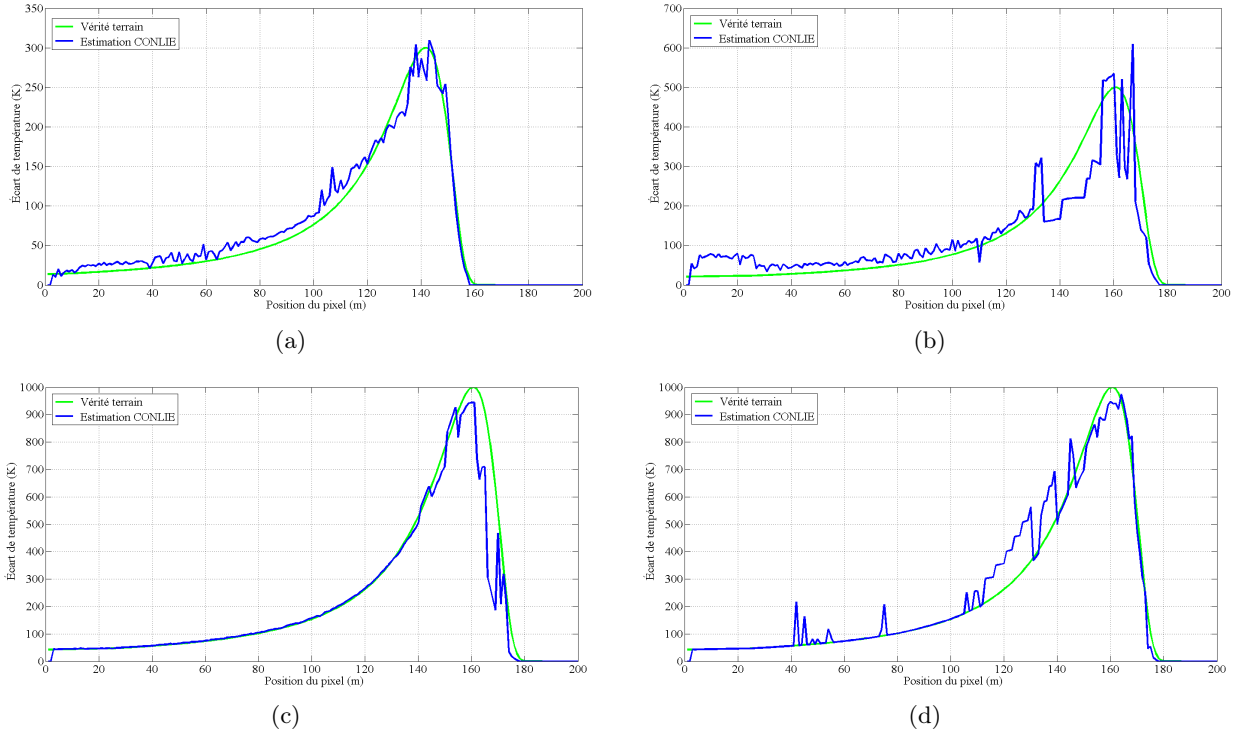


FIGURE 5.14 – Comparaison des écarts de température panache/air ambiant maximaux sur les profils verticaux. Cette comparaison entre les résultats obtenus avec CONLIE et les vrais écarts est réalisée sur une coupe longitudinale de chaque scène incluant la source du panache. (a) Scénario 1a. (b) Scénario 2a (sans NO_2). (c) Scénario 2b (avec NO_2). (d) Scénario 2b (sans NO_2).

tout de même quelques pixels pour lesquelles, la concentration estimée par CONLIE est égale à celle

de l'initialisation. Ce qui provient d'une mauvaise initialisation de la température du panache. Par conséquent, le processus itératif ne trouve pas un jeu de paramètre donnant une meilleure modélisation de la luminance mesurée.

Malgré les quelques pixels où CONLIE ne donne pas une meilleure estimation que son initialisation, pour l'ensemble des deux panaches la quantification reste très performante.

Dans le but d'illustrer les performances de CONLIE en terme d'estimation de la température de panache, nous avons représenté dans la figure 5.14 une comparaison des écarts de température maximaux sur les profils verticaux, le long d'une coupe longitudinale de nos différents panaches.

Sur la figure 5.14-(a) nous constatons que pour le cas de la raffinerie (scénario 1a), l'estimation de la température est assez bien réalisée le long du panache. En moyenne, l'erreur d'estimation pour ce panache est de 28 %. On constate par ailleurs, que les erreurs d'estimation de la température sont directement corrélés avec les erreurs d'estimation des concentrations des gaz du panache. Une sous-estimation de la température conduit à une surestimation des concentrations et vice versa.

Dans le cas des panaches de cimenterie, où seule la concentration du SO_2 est estimée (figures 5.14-(b) et 5.14-(d)), on constate des structures en escalier sur la courbe de l'écart de température estimé. Ces structures correspondent à l'initialisation de la température du panache, puisque nous évaluons des températures par palier de 50 K pour trouver la température optimale. Les pixels concernés sont ceux pour lesquels la concentration du SO_2 estimée par CONLIE est égale à la concentration d'initialisation. Pour ces pixels, les paramètres du panache obtenus lors de l'initialisation représentent des minima locaux de la fonction coût. C'est pour cette raison que nous ne pouvons pas avoir de meilleurs résultats pour ces pixels.

Enfin, pour le cas du panache 2b où la concentration du SO_2 est conjointement estimée avec celle du NO_2 (figure 5.14-(c)), on constate que la température du panache est très bien estimée sur la majeure partie du panache. Les erreurs d'estimation sont importants au voisinage de la source. Il s'agit là de la zone où les concentrations des deux gaz du panache sont aussi mal-estimées.

En comparant ce cas avec celui où seul le SO_2 est quantifié (figure 5.14-(d)), on se rend compte que les erreurs d'estimation dans le deuxième cas, sont essentiellement dues au fait de négliger dans notre modèle la participation du NO_2 au signal.

Pour conclure cette analyse des performances de la quantification par la méthode CONLIE, nous avons représenté les erreurs quadratiques moyennes de prédiction ($\sigma_{\text{prediction}}$) pour l'ensemble des applications de CONLIE réalisées sur nos scènes synthétiques. Les tableaux 5.1, 5.2 et 5.3

synthétisent les résultats obtenus pour les scénarii 1a, 2a et 2b respectivement.

$\sigma_{prediction} \text{ (ppm} \cdot \text{m)}$	Paramètres du fond connus		Paramètres du fond estimés	
	SO ₂	NH ₃	SO ₂	NH ₃
Estimation linéaire	639.00	88.69	67040.00	7907.80
Initialisation CONLIE	287.92	22.08	144.22	33.10
Estimation CONLIE	101.63	18.66	127.29	24.35

TABLE 5.1: Représentation de l'erreur quadratique moyenne de prédiction pour le cas de la raffinerie (scénario 1a).

$\sigma_{prediction} \text{ (ppm} \cdot \text{m)}$	Paramètres du fond connus	
	SO ₂	NO ₂
Estimation linéaire	144.70	791.25
Initialisation CONLIE	70.76	486.43
Estimation CONLIE	59.62	410.46

$\sigma_{prediction} \text{ (ppm} \cdot \text{m)}$	Paramètres du fond connus	Paramètres du fond estimés
	SO ₂	SO ₂
Estimation linéaire	143.10	7761.10
Initialisation CONLIE	53.43	33.95
Estimation CONLIE	39.95	58.60

TABLE 5.2: Représentation de l'erreur quadratique moyenne de prédiction pour le cas de la cimenterie (scénario 2a).

$\sigma_{prediction} \text{ (ppm} \cdot \text{m)}$	Paramètres du fond connus	
	SO ₂	NO ₂
Estimation linéaire	8139.50	8098.60
Initialisation CONLIE	3510.80	229.82
Estimation CONLIE	1589.50	701.29

$\sigma_{prediction} \text{ (ppm} \cdot \text{m)}$	Paramètres du fond connus	Paramètres du fond estimés
	SO ₂	SO ₂
Estimation linéaire	4552.00	9401200.00
Initialisation CONLIE	3167.30	35858.00
Estimation CONLIE	1798.40	30251.00

TABLE 5.3: Représentation de l'erreur quadratique moyenne de prédiction pour le cas de la cimenterie (scénario 2b).

Le tableau 5.1 représente les erreurs quadratiques moyennes de prédiction calculées pour le cas de la raffinerie (scénario 1a). Ce premier tableau permet de noter deux points importants. D'abord, on constate que l'introduction de contraintes spatiales lors de l'initialisation de CONLIE participe grandement à l'amélioration de la quantification. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas où les paramètres du fond ne sont pas connus *a priori*. De plus, on remarque que la non-connaissance *a priori*

des paramètres du fond entraîne une erreur de prédiction considérable pour l'approche linéaire. Cependant, avec la méthode CONLIE la non-connaissance du fond n'entraîne qu'une augmentation d'environ 20 % de l'erreur de prédiction pour les deux gaz de la raffinerie. Ce constat peut s'expliquer par le fait que l'essentiel de l'erreur dans le cas linéaire est dû aux pixels contenant de fortes concentrations de gaz. La pondération associée à ces pixels lors de l'ajout de contraintes spatiales est assez faible. Ils ont donc moins d'impact sur l'initialisation de CONLIE et *a fortiori* sur son résultat final.

Nous avons regroupé en outre, les erreurs quadratiques moyennes de prédiction calculées pour les scénarii 2a et 2b de la cimenterie dans les tableaux 5.2 et 5.3 respectivement.

Le cas de la cimenterie 2a (cas où seul le SO_2 est retrouvé) permet de confirmer nos conclusions précédentes sur l'impact des erreurs d'estimation des paramètres de fond. Cependant, dans le cas de la cimenterie 2b, les erreurs d'estimations des paramètres de fond induisent des erreurs d'estimation très importantes. On passe ainsi d'un $\sigma_{\text{prediction}}$ pour la méthode CONLIE égale à $1798.4 \text{ ppm} \cdot m$ à un $\sigma_{\text{prediction}}$ de $30251.0 \text{ ppm} \cdot m$. Ce résultat peut s'expliquer, d'une part, par les erreurs d'estimation des paramètres de fond dans ce cas. En effet, nous avons expliqué dans le chapitre 4 les difficultés rencontrées lors de la classification de cette scène. Compte tenu de l'importance de la classification lors de l'estimation de la luminance de fond (méthode CSB), on comprend bien que les contre-performances de la classification se répercutent sur l'estimation des paramètres du fond. D'autre part, ces erreurs sur les paramètres de fond conduisent à des très mauvaises estimations des paramètres du panache par l'approche linéaire. Par conséquent, même en appliquant des contraintes spatiales, nous n'avons pas réussi à obtenir une initialisation correcte de CONLIE. Rappelons tout de même qu'il s'agit pour ce scénario d'un cas extrême où l'écart de température est de 1000 K à la sortie de la cheminée et les concentrations sont 100 fois plus importantes que les concentrations nominales pour une cimenterie.

Enfin, il faut noter que les performances d'estimation du SO_2 ne semble pas dépendre beaucoup du fait que ce gaz est quantifié seul ou conjointement avec du NO_2 . Pour le scénario 2a, l'erreur de prédiction de CONLIE est légèrement meilleure lorsque le SO_2 est estimé seul. Tandis que pour le scénario 2b, où les concentrations du NO_2 ne sont pas négligeables, l'estimation conjointe des deux gaz permet d'améliorer un peu la quantification du SO_2 .

Dans l'ensemble, si on exclut le cas de l'estimation du SO_2 dans le scénario 2b sans connaissance *a priori* des paramètres du fond, CONLIE présente de très bonnes performances en comparaison à l'approche linéaire. Notre méthode donne des erreurs quadratiques moyennes qui oscillent entre 10 % et 30 % par rapport aux concentrations moyennes des scènes étudiées. Alors que pour l'approche

linéaire, l'erreur est au mieux égale à 70 % des concentrations moyennes (cas où les paramètres du fond sont connus).

5.3 Application de la méthode CONLIE sur des images réelles

5.3.1 Présentation des données

La méthode CONLIE a été appliquée sur des données réelles, acquises au-dessus de la raffinerie Jean Gaulin au Québec (cf. figure 5.15). L'image en question est issue des mesures réalisés par l'organisme canadien RDDC (*Recherche et développement pour la défense Canada*), en utilisant l'instrument Telops Hyper-Cam-LW [64]. Elle a été prise avec une résolution spectrale de 5.85 cm^{-1} dans la bande spectrale LWIR ($[7.98 - 11.24 \text{ }\mu\text{m}]$). L'acquisition de cette image a eu lieu le 25 mars



FIGURE 5.15 – Photo de la raffinerie Jean Gaulin à Lévis au Québec. (source : energievalero.ca)

2009 à 17h06, depuis un avion volant à une altitude de 2174.3 m.

Les deux cheminées indiquées dans la figure 5.15 correspondent à la cheminée principale (cheminée 1) et la cheminée du régénérateur de l'unité de craquage catalytique (cheminée 2). Les principales informations sur ces deux cheminées ont été regroupées dans le tableau 5.4. Ces deux cheminées sont les principaux responsables des émissions de SO_2 de la raffinerie. Sur l'acquisition de Telops, nous avons pu détecter la présence de ce gaz à la sortie de ces deux cheminées. Nous allons donc, par la suite, appliquer la méthode CONLIE sur ces deux panaches afin de quantifier leurs émissions de SO_2 .

Nom	Hauteur (m)	Diamètre (m)	Vélocité à la sortie (m/s)	Température à la sortie ($^{\circ}\text{C}$)
Cheminée 1	76.2	4.6	16.5	304
Cheminée 2	65.5	2.4	18.6	259

TABLE 5.4: Informations sur les deux cheminées étudiées de la raffinerie Jean Gaulin. (source : www.ec.gc.ca)

5.3.2 Traitements préliminaires

Estimation des profils atmosphériques

Le premier pré-traitement, que nous avons effectué en lien avec l'image de la raffinerie Jean Gaulin, a consisté à estimer l'atmosphère de cette scène. Étant donné qu'aucun radiosondage n'a été établi lors de cette acquisition, nous avons opté pour une estimation des profils atmosphériques (pression, température et vapeur d'eau) à partir des mesures météorologiques, comme nous l'avons déjà expliqué dans le paragraphe § 3.3.2.

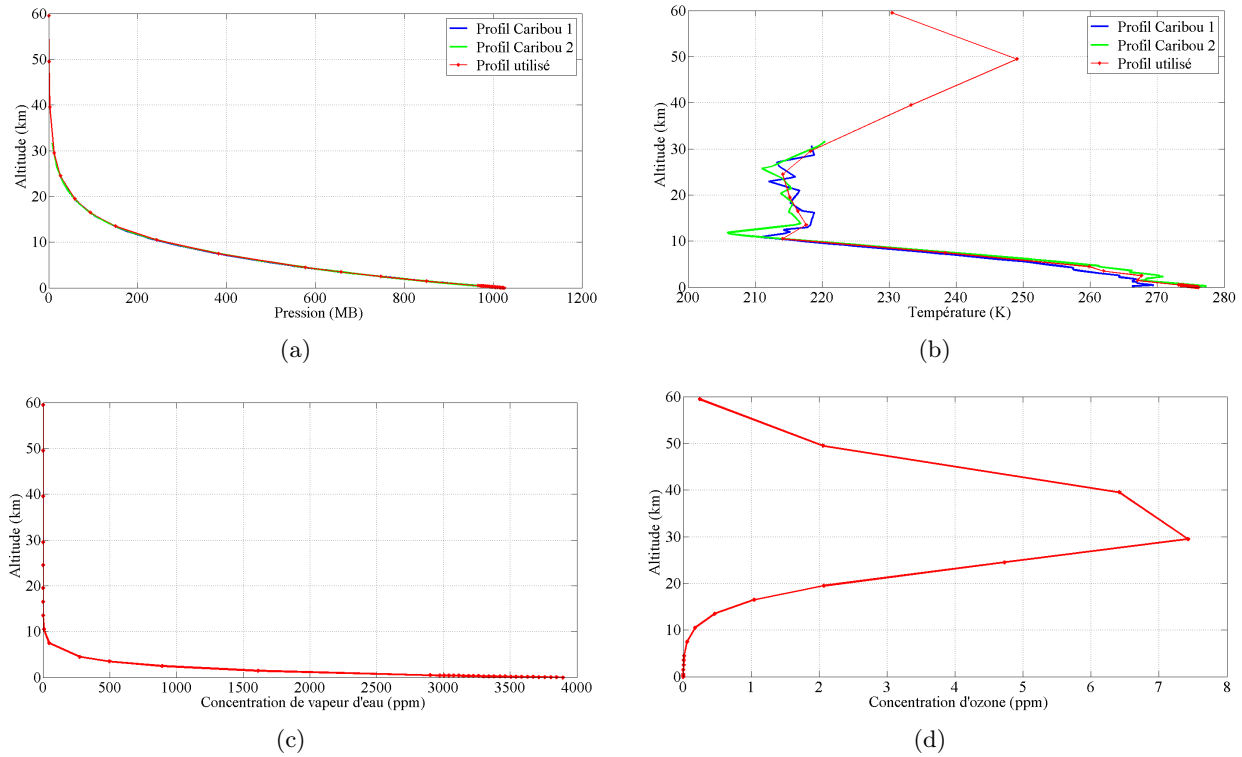


FIGURE 5.16 – Profils atmosphériques de la pression, de la température, et des concentrations de vapeur d'eau et d'ozone utilisés pour la modélisation de l'atmosphère de la raffinerie Jean Gaulin.

Tout d'abord, nous avons récupéré les relevés météorologiques correspondant à l'heure de l'acquisition, à partir du site de *Weather Underground*¹. Le tableau 5.5 regroupe les données qui nous intéressent :

Ce relevé météo a été réalisé au niveau de l'aéroport de Québec situé à environ 15 km de la raffinerie Jean Gaulin. Mais nous considérerons que ces mesures restent valables pour la raffinerie. Dans cette section, seule la première partie du tableau nous sera utile pour l'estimation des profils atmosphériques. On fera appel aux données de la deuxième partie lors de l'initialisation de la méthode CONLIE.

1. Weather Underground : <http://french.wunderground.com>

Heure	Pression (hPa)	Température ($^{\circ}C$)	Humidité (%)
17 :00	1025.8	3.0	52

Direction vent	Vitesse vent (m/s)	Couverture nuageuse
E / N-E	2.6	Partiellement nuageux

TABLE 5.5: Données météorologiques de la ville de Québec (aéroport) mesurées lors de l’acquisition de l’image Telops.

Comme expliqué dans le paragraphe § 3.3.2, l’absence de profils atmosphériques au-dessus de la ville de Québec, nous a conduit à utiliser ceux correspondant à la ville de Caribou (Maine). Ces radiosondages sont récupérés depuis le site du *Department of Atmospheric Science* de l’Université du Wyoming². Deux radiosondages autour de l’heure d’acquisition de l’image ont été utilisés pour estimer, par interpolation, les profils de la température et de la pression (cf. figure 5.16). Les profils de vapeur d’eau et d’ozone ont été estimés en utilisant les formules 2.5 et 2.6. L’équation 2.5 nécessite la connaissance de la concentration de la vapeur d’eau au niveau du sol. Cette concentration est déduite de l’humidité relative, de la pression et de la température du sol, données dans le tableau 5.5. On trouve une concentration de $3895.0 \text{ ppm} \cdot m$. Les profils obtenus sont illustrés dans la figure 5.16.

Détection des panaches

Pour traiter les deux panaches présents sur l’acquisition Telops, nous avons choisi de travailler sur deux imagerie contenant ces deux panaches. Une pré-détection *grossière et manuelle* a été réalisée en se basant sur les bandes d’absorption du SO_2 , afin de délimiter les deux sous-images. Étant donné la taille des deux panaches, nous avons travaillé avec une première imagerie de taille 100×100 autour du panache 1 issu de la cheminée principale. La deuxième imagerie autour du panache 2 de la cheminée 2 est de taille 70×70 .

L’algorithme de détection (SMF) présenté dans le chapitre 3 a été appliqué sur nos deux images. Pour le calcul de la matrice des covariances $\Sigma_{\mathbf{X}}$, nous avons utilisé deux sous-images hors panaches, ayant les mêmes tailles que nos images.

Après l’application de seuils sur les deux matrices d’abondance données par le SMF, nous avons réalisé des opérations morphologiques, explicitées dans le chapitre 3, pour éliminer les fausses détections. Pour la première cheminée, nous avons réussi à éliminer la quasi totalité des fausses détections. En revanche, pour la deuxième cheminée, il reste quelques structures ne contenant pas de panache, qui n’ont pas été éliminées lors des opérations morphologiques.

Sur les figures 5.17-(b) et 5.18-(b) nous pouvons voir la délimitation des deux panaches détectés sur

2. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

nos deux imagettes.

Classification des scènes

Après avoir défini la zone de présence des deux panaches, lors de la détection de ces deux derniers, nous avons effectué deux classifications sur chaque imagette. La première dans la zone du panache, alors que la deuxième portait sur la zone hors panache. Le but de ces classifications est de pouvoir estimer les paramètres du fond (luminance de fond et paramètres du sol) dans la zone du panache.

L'algorithme de classification, que nous avons décrit précédemment, a été appliqué sur les luminances des pixels concernées. Notons qu'à chaque fois les bandes d'absorption du SO_2 n'ont pas été considérées.

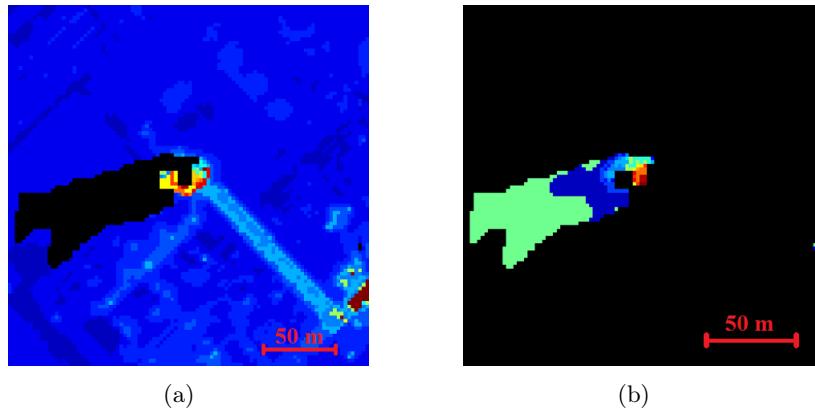


FIGURE 5.17 – Cartes des classifications réalisées sur le panache de la cheminée principale de la raffinerie Jean Gaulin. (a) Classification obtenue hors panache. (b) Classification obtenue sous le panache.

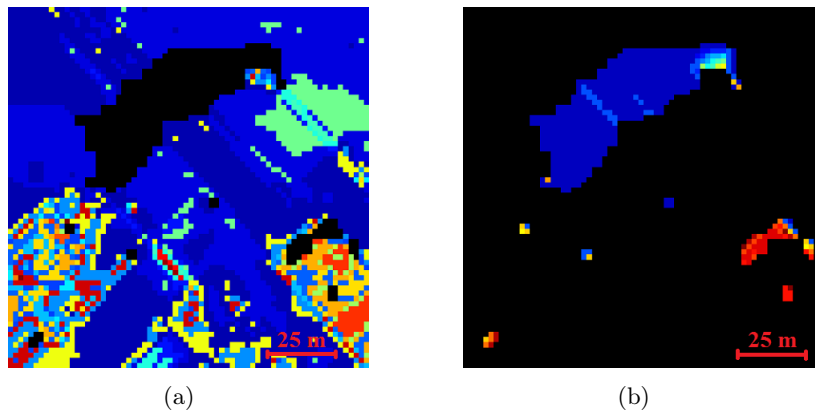


FIGURE 5.18 – Cartes des classifications réalisées sur le panache de la cheminée du régénérateur de l'unité de craquage catalytique de la raffinerie Jean Gaulin. (a) Classification obtenue hors panache. (b) Classification obtenue sous le panache.

Lors de nos différentes classifications, nous avons testé différentes valeurs pour le seuil D_{max} . L'objectif était d'obtenir un nombre de classes suffisamment grand pour avoir une meilleure estimation de la luminance de fond. Avec les seuils sélectionnés nous avons obtenu 21 classes hors panache et 17 classes sous le panache pour la première image (cheminée 1). Pour la deuxième image nous avons obtenu 23 classes hors panache et 21 classes sous le panache.

Les figures 5.17 et 5.18 illustrent les cartes de classifications hors et sous panache pour nos deux imagettes.

Estimation de la luminance de fond

La méthode CSB a été employée pour estimer la luminance de fond des pixels de nos deux panaches. Afin d'illustrer les résultats obtenus, nous avons représenté dans la figure 5.20 une comparaison entre la luminance mesurée et la luminance de fond estimée. Cette comparaison a été réalisée pour trois pixels différents. Le premier de ces pixels est extrait du panache 1, tandis que les deux autres sont issus du panache 2 (cf. figure 5.19).

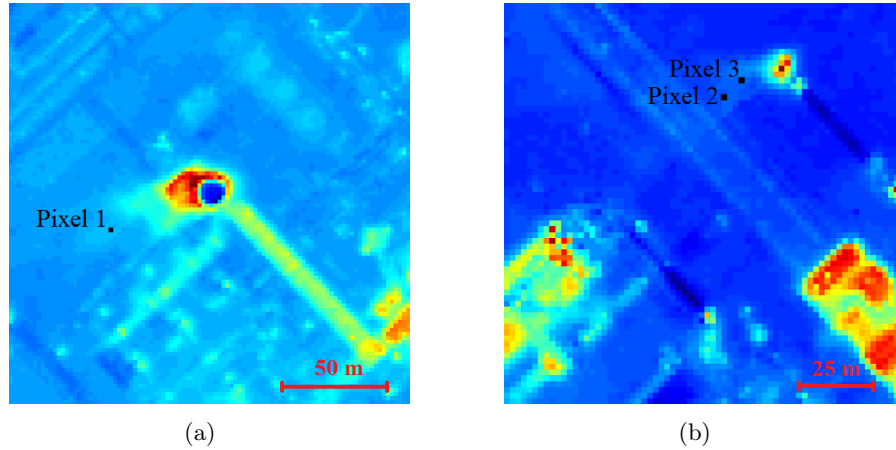


FIGURE 5.19 – Positions des trois pixels sélectionnés sur les deux panaches.

Pour le premier pixel (figure 5.20-(a)), nous remarquons que la luminance du fond est surestimée d'environ 5 %. On retrouve cette surestimation pour plusieurs pixels à travers les deux panaches. Elle peut s'expliquer par des erreurs de classification. Il faut souligner, de surcroît, un fort niveau de bruit que nous observons en particulier pour les pixels à hautes températures (voisinage des sources). En effet, l'acquisition traitée ici fait partie des premières images produites par cet instrument.

Avec les deux autres pixels, l'estimation de la luminance de fond semble être meilleure. Nous remarquons que pour le pixel 3 la luminance différentielle estimée est plus importante que pour le pixel 2. Ce qui s'explique par un plus fort écart de température entre le panache et l'atmosphère ambiante. De plus, les luminances mesurées pour ces deux pixels indiquent la présence d'au moins un

autre gaz que le SO_2 dans le panache. On observe, en effet, deux composantes d'émission au niveau des bandes $[935 ; 995 \text{ cm}^{-1}]$ et $[1025 ; 1095 \text{ cm}^{-1}]$. Malheureusement, nous n'avons pas réussi à identifier le (ou les) gaz responsable(s) de ces deux bandes d'émission.

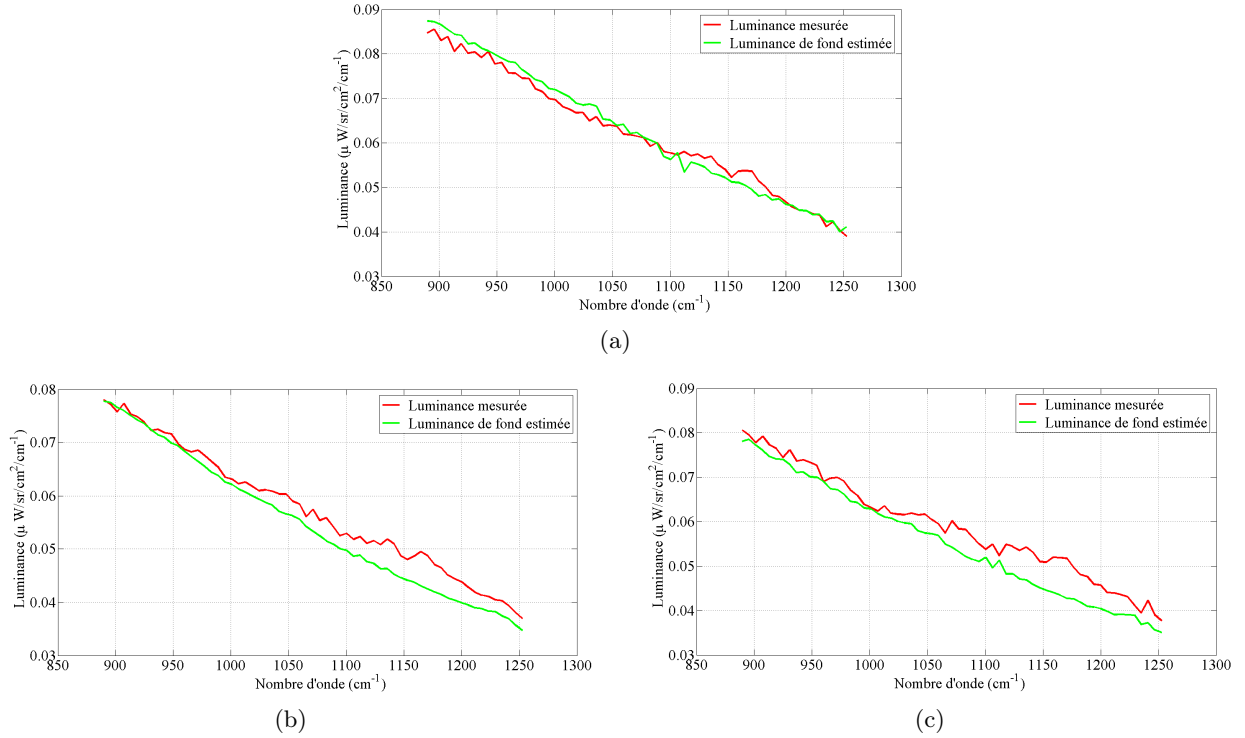


FIGURE 5.20 – Comparaison de la luminance de fond estimée (courbes vertes) avec la luminance mesurée par l'instrument HyperCam-LW (courbes rouges), pour trois pixels issus des deux panaches étudiés. (a) Comparaison des luminances pour le pixel 1. (b) Comparaison des luminances pour le pixel 2. (c) Comparaison des luminances pour le pixel 3.

Estimation des paramètres du sol

À partir des luminances de fond estimées pour les deux panaches, nous avons appliqué l'algorithme SpSm pour déterminer les paramètres du sol. Cet algorithme nécessite une correction atmosphérique préalable de la luminance L_{off} (cf. chapitre 3). Les profils atmosphériques estimés précédemment, nous ont servi à calculer la luminance atmosphérique montante (L_{atm}^ϵ) et la transmission atmosphérique (τ_{atm}). En connaissant ces deux termes, la luminance corrigée est alors donnée par : $L_{off,C} = \frac{L_{off} - L_{atm}^\epsilon}{\tau_{atm}}$.

Dans la figure 5.21, nous avons illustré la carte des températures de surface, retrouvées par l'algorithme SpSm, pour chacun des deux panaches étudiés.

On constate qu'au voisinage des cheminées, les températures retrouvées sont excessivement grandes (supérieures à 340 K). Ce qui s'explique par la mauvaise qualité des spectres pour les pixels à hautes températures. Mais dès qu'on s'éloigne des cheminées les températures obtenues varient

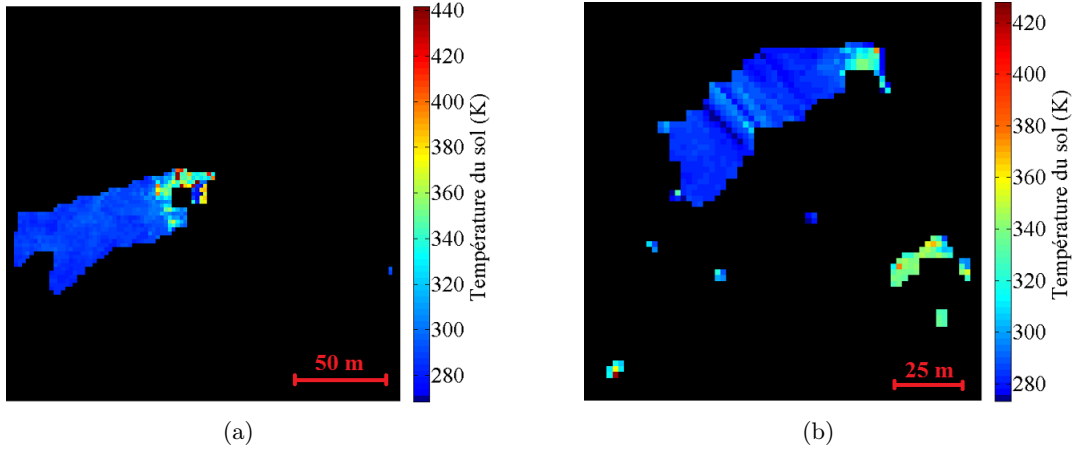


FIGURE 5.21 – Carte des températures de surface retrouvées par l’algorithme SpSm sur les deux panaches étudiés. (a) Panache issu de la cheminée 1. (b) Panache issu de la cheminée 2.

entre $[279 ; 300 \text{ K}]$ pour le premier panache, et $[274 ; 309 \text{ K}]$ pour le panache 2. Ces valeurs sont très cohérentes avec la température de l’air ambiant, qui est de 276.15 K (3°C). En conséquence, ces températures du sol sont réalistes pour cette période de l’année (25 mars).

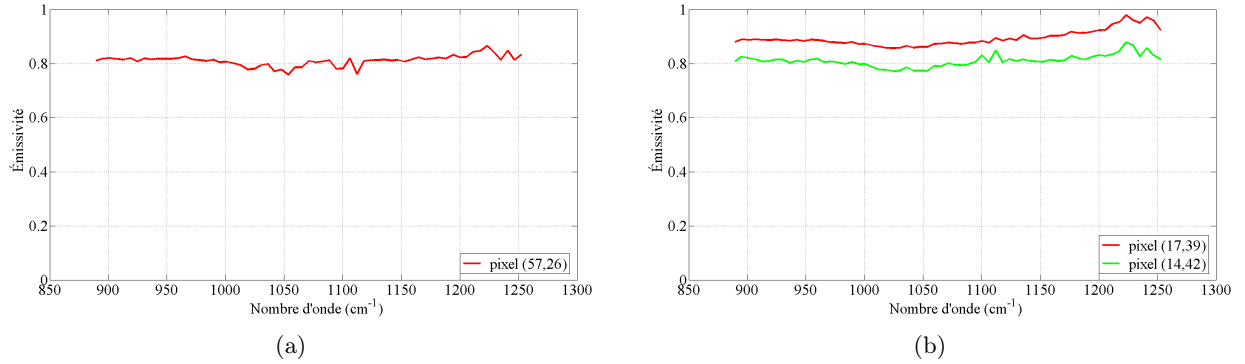


FIGURE 5.22 – Illustration des résultats d’estimation des émissivités du sol pour les deux imagerie de la raffinerie Jean Gaulin. (a) Émissivité obtenue pour le pixel 1. (b) Émissivités obtenues pour les pixels 2 et 3.

Les émissivités que nous retrouvons pour les trois pixels sélectionnés (figure 5.22), ont des spectres assez lisses et homogènes. Ces trois émissivités ont la même allure, ce qui suggère que les trois pixels sont composés du même matériau majoritaire.

Le niveau plus faible de l’émissivité du pixel 3, peut s’expliquer par une surestimation de la température du sol.

5.3.3 Résultats de la méthode CONLIE

Cette dernière section du présent document est consacrée à la présentation des performances de CONLIE sur l’acquisition de la raffinerie Jean Gaulin.

Pour les deux panaches de cette image, nous avons considéré que la concentration du SO_2 et l'écart de température panache/air ambiant suivent une distribution gaussienne. Nous avons alors opté pour la même implémentation de CONLIE que pour les données synthétiques. Ainsi, pour chaque pixel, les paramètres de notre panache se résument à une concentration maximale de SO_2 et un écart de température maximal sur le profil vertical.

Dans ce qui suit, nous expliquerons notre démarche pour initialiser le processus itératif de CONLIE. Puis dans un second temps, nous commenterons les résultats que nous avons obtenus.

Initialisation de la méthode CONLIE

Nous avons tenté dans une premier temps, d'initialiser les paramètres des deux panaches étudiés en suivant la même procédure que pour les scènes synthétiques. Malheureusement, la qualité médiocre des spectres d'une partie des pixels nous a conduit à adopter une autre approche. Pour les pixels en question, nous avons obtenu des écarts de température ou négatifs ou excessivement grands, lors de l'estimation en modélisation mono-couche. Ce qui fausse grandement les estimations des concentrations intégrées avec l'approche linéaire.

Nous nous sommes alors tournés vers une initialisation à partir d'une modélisation gaussienne des deux panaches. En effet, nous disposons de tous les paramètres nécessaires à la construction d'un modèle gaussien du panache, en appliquant les équations détaillées dans le chapitre 2. La vitesse du vent et la couverture nuageuse enregistrées au moment de l'acquisition (cf. tableau 5.5), indiquent selon le tableau 2.2 une classe de stabilité de Pasquill de type 'B'. Les distributions de panache obtenue avec cette classe instable, présentent de très grands gradients de concentrations comme on peut le voir sur la figure 5.23.

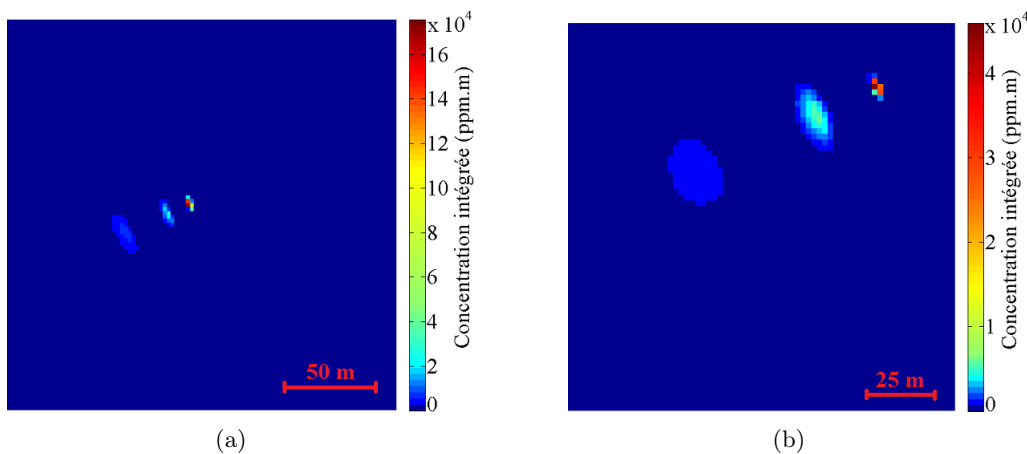


FIGURE 5.23 – Concentrations intégrées obtenues avec le modèle gaussien des panaches de la raffinerie Jean Gaulin. (a) Panche 1. (b) Panache 2.

Nous observons la présence de zone dans le panache où les concentrations sont très grandes en

comparaison au reste du panache. En dehors de ces zones d'accumulation du gaz la concentration est relativement faible et s'annule même à certains endroits. Le contraste utilisé fait que, sur la figure 5.23, seuls les zones d'accumulation sont visibles.

Lors de la modélisation gaussienne des deux panaches, nous avons utilisé des débits calculés à partir des émissions annuels de la raffinerie Jean Gaulin. Selon l'inventaire canadien des rejets de polluants en 2013, les émissions annuelles de la raffinerie en dioxyde de soufre sont de 5480.341 *tonnes*. En admettant un taux de fonctionnement moyen de la raffinerie de 300 *jours/an*, et une répartition des émissions de 2/3 pour la cheminée principale et 1/3 pour l'autre cheminée, les débits obtenus sont alors de : 140 *g/s* pour la première cheminée et de 70 *g/s* pour la cheminée 2.

Pour les deux panaches de la raffinerie, la comparaison des signaux mesurés au niveau du capteur au sein du panache, n'indique pas la présence de structures d'accumulation de gaz aussi marquées. Notons tout de même qu'en s'éloignant de la source, nous avons observé à certains endroits de légères augmentations de l'amplitude de la signature du SO₂. Compte tenu du bruit instrumental, il serait difficile de trancher si cette observation est due à la présence de zones d'accumulation ou au bruit des mesures.

Nous avons alors opté pour un modèle « mixte », où la distribution verticale est directement issue du modèle gaussien ci-dessus ; alors que la distribution spatiale évolue inversement avec la distance à la source.

Au niveau de la source, la concentration maximale sur le profil vertical est celle donnée par le modèle gaussien. L'écart de température maximal est déduit, quant à lui, de la température à la sortie de la cheminée (cf. tableau 5.4). Pour les autres pixels du panache, la concentration maximale sur le profil est directement obtenue en divisant la concentration maximale à la source par la distance du pixel concerné à la source. On calcule l'écart maximal de température de la même façon.

Les distributions de concentration et d'écart de température ainsi obtenues, sont alors utilisées pour initialiser le processus itératif de CONLIE.

Analyse des résultats de la méthode CONLIE

Lors de notre application de la méthode CONLIE sur les panaches de la raffinerie Jean Gaulin, nous avons remarqué que les paramètres de convergence (nombre d'itérations, facteur d'amortissement) ne doivent pas être les mêmes que pour les images synthétiques. Pour assurer une bonne convergence, nous avons fixé initialement le facteur d'amortissement à 10⁵. Puis, à chaque fois que la fonction coût est améliorée ce facteur est divisé par 2, sinon il est multiplié par 2. De plus, le nombre maximal d'itérations est fixé à 50 au lieu de 10 pour les images synthétiques. Nous constatons que pour la majorité des pixels, la convergence survient avant les 20 premières itérations.

Par ailleurs, pour assurer une bonne convergence de la méthode CONLIE, nous étions amenés à appliquer un offset sur notre signal simulé ($\mathbf{F}(\theta)$) afin de mieux approcher le signal mesuré (\mathbf{M}). En effet, il existe plusieurs sources d'erreurs et de bruits, que nous ne prenons pas dans notre modèle, qui sont responsable de l'écart observé entre les deux signaux. À titre d'exemple, nous pouvons citer l'erreur sur l'estimation des profils atmosphériques et le bruit instrumental, qui est assez élevé pour cette acquisition. Cet offset a été appliqué sur les températures de brillance associé aux luminances issues de notre modèle ($\mathbf{F}(\theta)$). Il varie linéairement avec le nombre d'onde.

Pour chaque pixel, nous l'avons fixé à partir des deux points pour lesquels le signal mesuré atteint son minimum sur les intervalles spectraux $[900 ; 950 \text{ cm}^{-1}]$ et $[1200 ; 1250 \text{ cm}^{-1}]$. Le but étant de faire coïncider le signal utilisé lors de l'initialisation de CONLIE avec le signal mesuré, pour ces deux points. Sur la figure 5.24, nous pouvons voir, pour les trois pixels sélectionnés, l'effet de l'offset appliqué sur le signal initial. Les courbes noires pointillées correspondent aux températures de brillance du signal initial avant l'application de l'offset. Tandis que les courbes vertes représentent

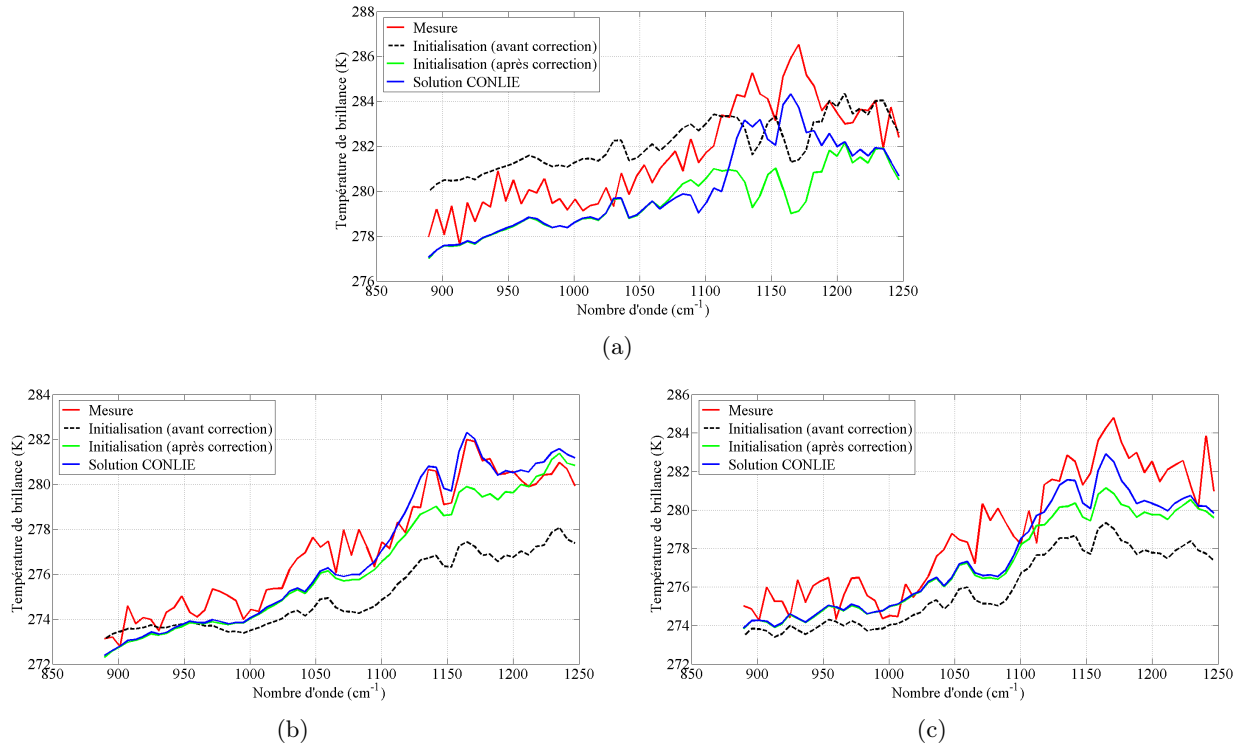


FIGURE 5.24 – Illustration de la convergence de CONLIE en terme de température de brillance, pour trois pixels issus des deux panaches étudiés. Les courbes rouges représentent les températures de brillance en entrée du capteur. Les courbes noires pointillées et vertes correspondent aux températures de brillance utilisées pour initialiser CONLIE. Les courbes vertes s'obtiennent à partir des courbes noires pointillées en corrigeant l'offset observé sur les données de Telops. Enfin, les courbes bleues sont obtenues à la fin du processus itératif. (a) Convergence pour le pixel 1. (b) Convergence pour le pixel 2. (c) Convergence pour le pixel 3.

les températures de brillance de ce même signal après l'ajout de l'offset. On constate bien, que ces courbes coïncident avec les courbes rouges représentant les températures de brillance du signal mesuré, sur les minima locaux des intervalles $[900 ; 950 \text{ cm}^{-1}]$ et $[1200 ; 1250 \text{ cm}^{-1}]$.

Sur les graphes de la figure 5.24, les températures de brillance obtenues à la convergence de CONLIE sont représentées en bleu. Ces courbes permettent de valider la pertinence de l'estimation des paramètres du panache avec CONLIE. Pour le pixel 2 (figure 5.24-(b)), on remarque que sur les bandes d'absorption du SO_2 , la température de brillance du signal calculé à la fin du processus itératif concorde bien avec la température de brillance du signal mesuré. Ce qui signifie que la concentration et température du panache estimés sont très proches des vraies valeurs.

Pour les deux autres pixels, la concordance est moins évidente, car les bruits sur le signal mesuré n'ont pas été parfaitement corrigés. En revanche, il faut noter que sur les bandes d'absorption du SO_2 , les amplitudes des pics d'émissions obtenus avec le signal $\mathbf{F}(\theta_f)$ sont proches de celles observées sur le signal mesuré. Nous pouvons donc en déduire que pour ces deux pixels, les paramètres du panache estimés par CONLIE ne sont pas très éloignés des vraies valeurs.

Nous avons illustré sur la figure 5.25 les concentrations intégrées estimées sur les deux panaches de la raffinerie étudiée. En outre, les écarts de température maximaux sur les profils verticaux sont représentés sur la figure 5.26.

Lors de notre application de CONLIE aux deux panaches, nous avons remarqué que pour une grande partie des pixels, les paramètres du panache n'ont pas été modifiés lors du processus itératif. Ces pixels ont été représentés en blanc sur les figures 5.25 et 5.26. Pour ces pixels, les paramètres d'initialisation représentent un minimum local de la fonction coût.

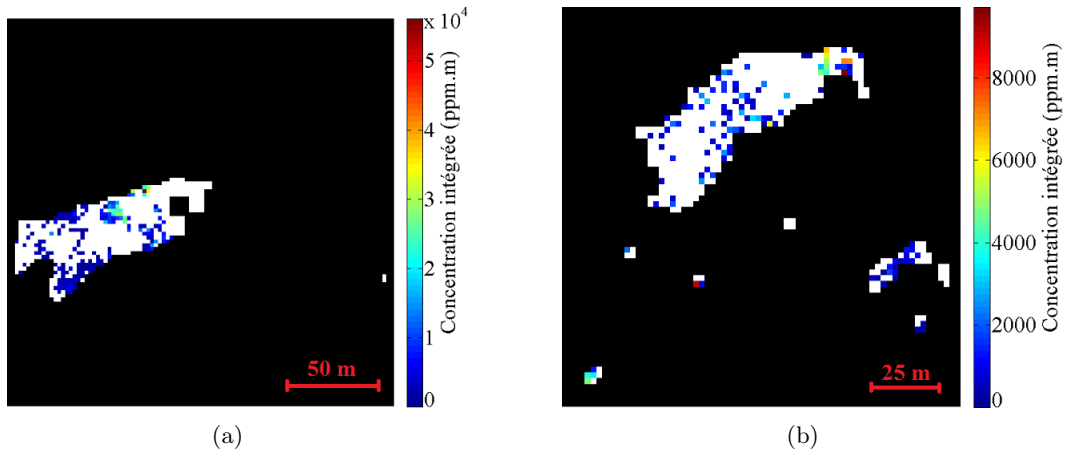


FIGURE 5.25 – Cartes des concentrations intégrées retrouvées par CONLIE sur les deux panaches de l'image de la raffinerie Jean Gaulin. (a) Panache issu de la cheminée 1. (b) Panache issu de la cheminée 2.

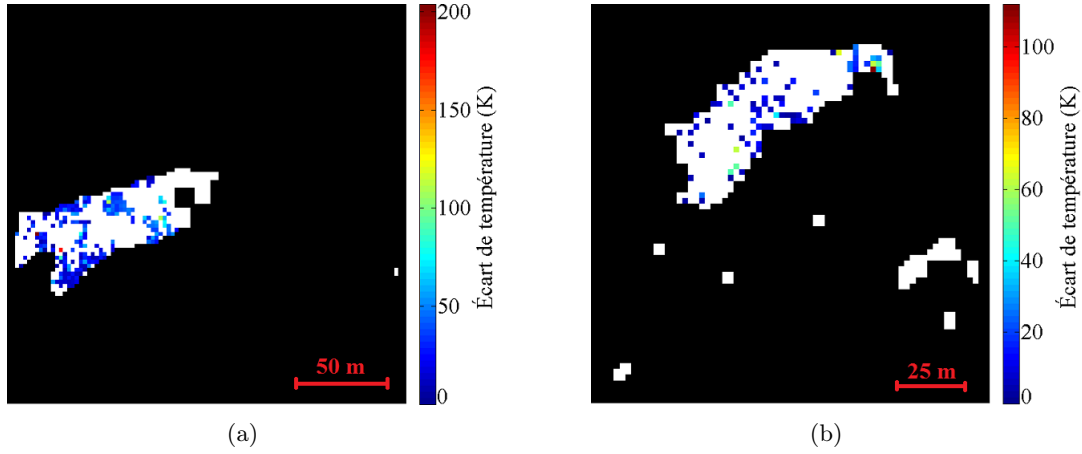


FIGURE 5.26 – Cartes des écarts de température maximaux sur les profils verticaux, retrouvés par CONLIE sur les deux panaches de l’image de la raffinerie Jean Gaulin. (a) Panache issu de la cheminée 1. (b) Panache issu de la cheminée 2.

Pour expliquer ce constat, deux raisons peuvent être avancées. La première réside dans une initialisation très éloignée des vraies paramètres des panaches étudiés. Seulement, nous avons vu à travers les deux panaches, des pixels pour lesquels l’estimation de CONLIE a très bien fonctionné (cf. figure 5.24). En conséquence, cette première explication peut être écartée.

Il faut noter par ailleurs, que le bruit de mesure observé sur cette acquisition est très élevé. Ainsi, pour certains pixels le signal utile est noyé dans le bruit. Pour ces pixels, il est donc très délicat d’améliorer notre modélisation du signal. Ce qui explique qu’à la fin du processus itératif, CONLIE retourne exactement les mêmes paramètres utilisés lors de son initialisation.

Pour les pixels sur lesquels la méthode CONLIE a abouti, nous pouvons noter une certaine cohérence spatiale des paramètres retrouvés. Dans l’ensemble, on remarque que les concentrations et les écarts de température décroissent en s’éloignant de la source.

Pour ce qui est des valeurs estimées, nous constatons que les écarts de température sont en accord avec les températures d’éjection indiquées dans le tableau 5.4. En effet, l’écart de température est au maximum égal à 204 K pour le premier panache, et 112 K pour le second panache. Sachant que la température de l’air ambiant est de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, selon les chiffres du tableau 5.4 les écarts de température à la source seraient de 301 K (panache 1) et 256 K (panache 2).

Cependant en ce qui concerne les concentrations estimées, nous n’avons malheureusement pas de moyen fiable pour vérifier la cohérence des valeurs retrouvées.

5.4 Conclusion

L’objectif de ce dernier chapitre était d’étudier les performances de la méthode CONLIE pour la quantification des panaches. Dans un premier temps, cette dernière a été évaluée sur les scènes

synthétiques de raffinerie et de cimenterie. Ensuite, nous avons détaillé les résultats obtenus en appliquant CONLIE à une image réelle, acquise dans la bande LWIR, par l'instrument HyperCam-LW de Telops.

L'application de la méthode CONLIE sur les scènes synthétiques a permis de quantifier les erreurs de prédiction de cette méthode, et de les comparer à celles de l'approche linéaire OLS. Cette comparaison a été effectuée pour différents cas de figures : connaissance ou non des paramètres du fond, estimation conjointe du SO_2 et du NO_2 ou du SO_2 seul (scènes de la cimenterie).

Nous avons montré, lors de cette comparaison, que le gain de précision apporté par la méthode CONLIE est considérable. Avec cette méthode, les erreurs quadratiques de prédiction sont de l'ordre de 30 % dans le cas le plus défavorable (les paramètres de fond ne sont pas connus). Tandis que pour le cas le plus favorable - où les paramètres du fond sont connus - les erreurs quadratiques de prédiction obtenues avec OLS atteignent les 70 %.

Nous avons aussi montré que pour la méthode CONLIE, les erreurs d'estimation des paramètres de fond sont responsables de 20 % des erreurs quadratiques de prédictions des concentrations intégrées.

Concernant l'estimation des températures du panache, la comparaison des ΔT estimés par CONLIE avec leurs vraies valeurs montre des résultats satisfaisants. De manière globale, les écarts de température estimés sont assez proches de la vérité terrain.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, la méthode CONLIE a été testée sur une acquisition en bande LWIR, au-dessus de la raffinerie Jean Gaulin. Sur cette image, deux panaches émettant du SO_2 ont pu être localisés.

L'ensemble des traitements préliminaires à l'application de CONLIE (cf. figure 4.1) a été réalisé sur ces deux panaches, en utilisant les outils décrits précédemment.

En revanche, en raison d'un bruit de mesure assez important sur l'acquisition étudiée, nous étions amené à modifier notre approche d'initialisation. Nous avons opté pour un modèle « mixte », où la distribution verticale est issue d'un modèle gaussien ; alors que la distribution spatiale évolue inversement avec la distance à la source.

À la fin du processus itératif, nous constatons que pour beaucoup de pixels, CONLIE retourne exactement les mêmes paramètres utilisés lors de son initialisation. Néanmoins, pour les autres pixels, l'estimation de CONLIE présente une bonne cohérence à la fois en termes de modélisation des bandes d'absorption du SO_2 (figure 5.24), de l'évolution spatiale des paramètres retrouvés, et des valeurs des températures au sein du panache.

Pour conforter nos conclusions sur les performances de cette méthode, il est nécessaire de l'appliquer sur d'autres acquisitions réelles moins bruitées, et de confronter les résultats obtenus à des

mesures *in situ*.

Conclusion et perspectives

Conclusions générales

L'objectif de cette thèse consistait à développer une approche permettant de caractériser des émissions anthropiques de gaz polluants et de cartographier leurs concentrations respectives près des sources, par imagerie hyperspectrale infrarouge aéroportée à haute résolution spatiale.

En effet, une multitude d'espèces gazeuses possèdent une signature spectrale dans l'infrarouge médian ($3 - 5 \mu m$) et thermique ($7.5 - 12.5 \mu m$). De plus, les développements techniques récents sur les imageurs hyperspectraux aéroportés, en termes de résolution spectrale, spatiale et radiométrique en font un outil performant pour l'étude et le suivi des émissions des sites industriels.

Afin de répondre à cet objectif, nous avons suivi une démarche comportant deux volets. Le premier consistait à étudier la modélisation directe de l'impact radiatif des panaches de gaz sur le signal reçu en entrée des capteurs aéroportés. Le but était, d'une part, de comprendre la contribution de chaque paramètre dans le signal final. D'autre part, cette étude visait à construire une base d'images hyperspectrales synthétiques, où tous les paramètres de la scène sont connus.

Le deuxième volet de notre démarche se focalisait sur le développement d'un modèle inverse, permettant de retrouver les paramètres du panache à partir de la luminance en entrée du capteur.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux caractéristiques des panaches anthropiques. L'objectif était avant tout de pouvoir définir des scénarii d'étude pertinents, qui nous serviront de base pour générer des images hyperspectrales synthétiques. Trois activités anthropiques (raffinerie, cimenterie et déchetterie) ont été sélectionnées, à ce stade, pour notre modélisation. En effet, les rejets de ces activités comportent des gaz faisant l'objet de réglementations spécifiques, et présentant des signatures dans le domaine infrarouge (médian et/ou thermique). À partir de ces trois scènes, cinq scénarii d'étude ont été définis, pour englober notamment le cas d'un accident industriel et des émissions multi-sources.

Nous avons développé ensuite, un outil de synthèse d'images hyperspectrales, qui nous a permis de générer les images correspondantes à nos cinq scénarii. Cet outil consiste à définir pour chaque

pixel les paramètres liés à la surface du sol, aux profils atmosphériques et aux gaz du panache qu'il contient. Puis de réaliser un calcul de transfert radiatif permettant de déterminer la luminance en entrée du capteur aéroporté pour ce pixel.

Ainsi, des images synthétiques des cinq scénarii sélectionnés ont été générées, à la fois en bande MWIR et en bande LWIR. Les résolutions spectrales considérées correspondent aux résolutions des instruments réels : 10 cm^{-1} en infrarouge médian et 5 cm^{-1} en infrarouge thermique. En outre, des bruits de mesures gaussiens ont été ajoutés à ces images synthétiques. Pour être en accord avec les performances des instruments réels, nous avons fixé la NEDT (*Noise Equivalent to Differential Temperature*) à 200 mK en bande MWIR, et à 50 mK en bande LWIR.

Une fois notre base d'images hyperspectrales construite, nous nous sommes penchés sur le développement d'une méthode capable d'estimer les différents paramètres des gaz du panache.

Une étude de l'état de l'art nous a permis de définir les principales étapes que devrait englober une telle méthode. D'abord, il faut détecter le panache en identifiant les gaz qui le composent. Ensuite, il faut déterminer les paramètres de la scène qui ne sont pas liés au panache (paramètres atmosphériques, paramètres du sol). L'estimation des paramètres du panache n'intervient alors qu'en dernier lieu.

Pour chacune de ces étapes, une comparaison des approches présentes dans la littérature a été effectuée. Le but étant de déduire les points forts et les limitations de chaque approche, afin d'en tenir compte lors du développement de notre méthode.

Ainsi, dans le chapitre 3, après avoir passé en revue les différentes techniques de détection de panache, nous avons sélectionné la méthode SMF (*Spectral Matched Filter*). Cette méthode intègre des connaissances *a priori* des gaz du panache, ce qui réduit son taux de fausses détections.

Nous avons, par ailleurs, exploré les principales techniques de correction atmosphérique et de découplage de l'émissivité et de la température du sol. Ces deux familles d'algorithmes permettent d'estimer respectivement les paramètres atmosphériques et les paramètres du sol. Nous avons alors opté pour une estimation des profils atmosphériques (pression, température et vapeur d'eau) à partir des relevés météorologiques, puis de retrouver les paramètres atmosphériques (luminance montante et transmission) en utilisant des simulations MODTRAN. D'autre part, l'estimation des paramètres du sol sera effectuée avec l'algorithme SpSm (*Spectral Smoothness*) développé par Kanani [57].

Lors de la dernière partie consacrée à l'état de l'art, nous avons étudié différents algorithmes dédiés à la caractérisation des panaches. Selon les hypothèses de modélisation de la transmission du panache, ces méthodes peuvent être classées en deux familles : approches linéaires et approches non-linéaires. La comparaison des différents algorithmes présentés, met en évidence certaines limitations

de ces derniers. D’abord, on note que les approches linéaires sont bien adaptées pour des faibles concentrations intégrées et à température de panache connue. Cependant, leurs performances sont très vite détériorées pour des concentrations importantes. Les méthodes non-linéaires donnent des résultats convenables indépendamment des concentrations. Seulement les temps d’exécution pour ces méthodes sont très élevés. Une nouvelle méthode développée par *Niu et al.* [25] représente un bon compromis entre ces deux familles, dans le cas où la température du panache est connue.

En outre, la majorité des méthodes rencontrées ont une approche de quantification pixel-à-pixel. Ce qui ne permet pas d’introduire des contraintes sur la distribution spatiale du panache. On est par conséquent, très dépendant des erreurs introduites par l’hétérogénéité du sol.

De plus, ces méthodes ne traitent pas la distribution verticale des panaches. Elles considèrent, entre autre, que les panaches sont des couches homogènes en température. Ce qui représente une source importante d’erreur sur l’estimation finale des concentrations du panache. Nous avons montré que l’erreur moyenne sur l’écart de température de brillance dû au gaz peut atteindre 60 % pour les pixels proches de la source.

Enfin, les méthodes actuelles de quantification de panache n’exploitent que la bande LWIR (8 – 12 μm). Des gaz importants comme le méthane (CH_4) ou le monoxyde de carbone (CO), ne peuvent donc pas être quantifiés par ces approches, car ils signent essentiellement dans la bande MWIR (3 – 5 μm).

L’étude comparative de ces méthodes de quantification de panache, nous a conduit à proposer une nouvelle approche capable d’apporter des solutions aux limitations des méthodes existantes. Cette approche vise tout d’abord à déterminer tous les paramètres de la scène, qui ne sont pas directement liés au panache : luminance de fond, paramètres de l’atmosphère et paramètres du sol. Une fois ces étapes réalisées, un modèle non-linéaire multi-couches du panache est utilisé lors d’une optimisation itérative, pour remonter aux températures et concentrations du panache. Cette optimisation nécessite une initialisation, que nous construisons à partir d’une quantification linéaire mono-couche du panache.

En utilisant des contraintes spatiales sur les concentrations et les températures, notre approche permet de réduire l’impact de l’hétérogénéité du sol. De surcroît, cette dernière est facilement adaptable à la bande MWIR.

Après avoir étudié, dans le chapitre 4, les performances de chacune des étapes préliminaires de cette approche, nous avons consacré le chapitre 5 à l’analyse des résultats obtenus avec la méthode CONLIE (*Constrained Optimal Non-Linear Iterative Estimation*). Il s’agit en effet, du module d’optimisation itératif permettant de retrouver les paramètres du panache, en minimisant la fonction coût ($\chi(\theta)$) définie par l’expression 4.5. Le principe consiste à déterminer les concentrations et tem-

pératures du panache pour lesquelles le signal obtenu par notre modèle non-linéaire multi-couches est le plus proche du signal mesuré. Cette fonction coût inclut aussi une composante contraignant les paramètres à se rapprocher d'un modèle *a priori*. Lors de l'implémentation de CONLIE, nous avons utilisé l'algorithme d'optimisation Levenberg-Marquardt.

Cette méthode est évaluée à la fois sur des scènes synthétiques et réelles. Sur les scènes synthétiques, CONLIE apporte un gain de précision considérable par rapport à la méthode OLS - l'approche linéaire qui nous a servi lors de l'initialisation -. Dans le cas le plus défavorable, l'erreur de prédiction de la concentration intégrée est de l'ordre de 30 % pour la méthode CONLIE. Alors qu'avec la méthode OLS, cette erreur est de l'ordre de 70 %, dans le cas le plus favorable. Par ailleurs, il convient de noter que notre approche permet d'avoir une cartographie des panaches, en termes de concentrations et de températures.

Une évaluation qualitative de CONLIE a été réalisée sur une acquisition réelle, obtenue par l'instrument HyperCam-LW de Telops en bande LWIR. Sur cette image, deux panaches de SO₂ ont pu être localisés.

Sur une partie des pixels étudiés, le niveau très élevé du bruit de mesures n'a pas permis une convergence de l'algorithme d'estimation. Cependant, pour les autres pixels, l'estimation de CONLIE présente une bonne cohérence à la fois en termes de modélisation des bandes d'absorption du SO₂, de l'évolution spatiale des paramètres retrouvés, et des valeurs des températures au sein du panache.

Le principal inconvénient de cette approche de quantification de gaz réside dans un temps d'exécution très élevé. Le traitement de chaque pixel nécessite entre 10 et 20 s. Alors, que l'approche OLS permet de traiter une image complète en moins d'une minute.

De plus, en raison des seuils de détection spécifiques aux différents gaz, il est impossible de caractériser des pixels ayant des concentrations plus faibles que ces seuils.

Perspectives

Les objectifs initiaux, rappelés dans la section précédente, ont donc bien été atteints. L'approche développée permet, en effet, de caractériser des émissions anthropiques de gaz polluants et de cartographier leurs concentrations respectives près des sources. Cependant, plusieurs voies d'améliorations peuvent être explorées.

En ce qui concerne l'outil de synthèse d'images hyperspectrales, nous avons utilisé dans nos

travaux la version 4 de MODTRAN. Une adaptation de cet outil avec la nouvelle version MODTRAN 5.2 permettrait de tirer avantage des nouvelles fonctionnalités de cette version. À titre d'exemple, avec cette nouvelle version, il serait possible de rajouter de nouveaux gaz à ceux déjà intégrés dans MODTRAN. Cet ajout nécessite simplement la connaissance de l'absorbance du gaz en question.

D'autres parts, il est envisageable d'améliorer notre modélisation du panache, en travaillant avec l'hypothèse de couches de panaches finies dans le plan. En effet, notre démarche jusqu'à lors, était de considérer le panache comme étant constitué de couches planes infinies. Cette hypothèse a un impact direct sur le calcul de l'éclairement descendant au sol. En conséquence, la prise en compte de cette amélioration impactera essentiellement le signal reçu au niveau du capteur pour les pixels réfléchissants.

Lors de nos travaux, le capteur était toujours considéré comme étant placé au nadir de la scène. Il serait donc souhaitable d'intégrer dans notre modélisation la possibilité d'avoir d'autres angles de visée. Il existe, en effet, des instruments hyperspectraux capables d'acquérir des images en visée horizontale, à partir du sol. Il serait donc intéressant de s'adapter à ce type d'instruments, en raison de leur bas coût d'exploitation.

Par ailleurs, plusieurs perspectives sont envisageables pour l'approche de caractérisation de panache. D'abord, à court terme, une étude de sensibilité de CONLIE devrait être réalisée. En effet, l'application de cette méthode sur l'acquisition de la raffinerie Jean Gaulin nous a montré que cette méthode est assez sensible au bruit de mesures. Il est donc important d'étudier l'impact du bruit de mesures sur la qualité de l'estimation des paramètres du panache. De plus, il est important d'évaluer l'impact sur les performances de CONLIE d'une erreur sur le modèle gaussien utilisé pour contraindre les paramètres. Il serait aussi intéressant de tester différentes approches pour contraindre les paramètres du panache. Par exemple, une régularisation de type Tikhonov serait un bon moyen pour s'affranchir d'un modèle de contraintes prédéfini, et par conséquent peu adaptable à différents scénarii.

Rappelons que la caractérisation des panaches du scénario 1b de la raffinerie n'a pas été effectuée complètement, car le modèle de contraintes gaussiennes n'était pas adapté à cette scène.

À moyen terme, CONLIE doit être complètement adaptée à la bande MWIR. Ce qui constituerait un apport conséquent, étant donné le nombre très réduit de travaux réalisés dans ce domaine.

En outre, des améliorations de CONLIE devraient être imaginées pour pouvoir prendre en compte des informations issues d'autres instruments, afin de mieux caractériser les panaches. Ainsi, si des mesures LIDAR sont réalisées conjointement avec une acquisition hyperspectrale, CONLIE devrait pouvoir exploiter les distributions linéiques de concentration retrouvées grâce au lidar, afin d'amé-

liorer l'estimation globale de la concentration.

Enfin, pour conforter les résultats obtenus avec cette méthode, il serait judicieux de l'appliquer sur d'autres images de panaches industriels. Et si possible, de confronter les paramètres retrouvées avec des mesures *in situ*. Ainsi, il serait intéressant de mettre au point une compagne d'acquisition d'images hyperspectrales aéroportées au dessus d'un site industriel. Une base de connaissances *a priori* peut être construite en utilisant des mesures d'instruments complémentaires tels qu'un spectroradiomètre (émissivités du sol), un thermomètre infrarouge (températures du sol), un radiomètre micro-onde (profils atmosphériques : hors et dans le panache), un lidar (distribution linéique des concentrations selon la direction de visée).

Bibliographie

- [1] European Commission. Communication de la commission au conseil et au parlement européen : Stratégie thématique sur la pollution atmosphérique. Technical report, Commission au Conseil et au Parlement Européen, 2005.
- [2] Direction Générale de l'Énergie et du Climat. Bilan de la qualité de l'air en France en 2011, et des principales tendances observées au cours de la période 2000 – 2011. Technical report, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2011.
- [3] J.R. Drummond and J.S. Mand. The measurements of the pollution in the troposphere (mopitt) instrument : Overall performance and calibration requirements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38 :314–320, 1996.
- [4] T. Pagano, D.A. Elliot, M.R. Gunson, H.H. Aumann, S.L. Gaiser, N. Dehghani, and K. Overoye. Operational readiness of the atmospheric infrared sounder on the earth observing system aqua spacecraft. In *Proceedings of SPIE, Earth Observing Systems VI*, volume 4483, Jul. 2001.
- [5] Reinhard Beer, Thomas A. Glavich, and David M. Rider. Tropospheric emission spectrometer for the earth observing system' aura satellite. *Applied Optics*, 40(15) :2356–2367, May 2001.
- [6] G. Chalon, F. Cayla, and D. Diebel. Iasi : An advanced sounder for operational meteorology. In *52nd IAF congress*, Oct. 2001.
- [7] G. de Leeuw, S. Kinne, J-F. Léon, J. Pelon, D. Rosenfeld, M. Schaap, P.J. Veefkind, B. Veihelmann, D.M. Winker, and W. von Hoyningen-Huene. *The Remote Sensing of Tropospheric Composition from Space*, chapter Retrieval of aerosol properties, page 536. Springer, 2011.
- [8] L. Forti, Ph. Jouette, O. Le Bihan, Y. Le Moullec, L. Le Souffache, X. Montagne, and H. Ravellomanantsoa. Les aérosols (pm2.5) en milieu urbain : Origine et quantification des contributions des différentes sources par une approche multi-isotopique (c, n, pb, sr). Technical report, BRGM, Dec. 2006.
- [9] M. Mallet, R. Van Dingenen, J. C. Roger, S. Despiiau, and H. Cachier. In situ airborne measurements of aerosol optical properties during photochemical pollution events. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres (1984–2012)*, 110(D3), 2005.
- [10] Centre Interprofessionnel Technique d'Études la Pollution Atmosphérique. Polluants atmosphériques et gaz à effet de serre. <http://www.citepa.org/fr/>, Consulté le 19 Février 2013.
- [11] L. Ritter, K.R. Solomon, J. Forget, M. Stemeroff, and C. O'Leary. Les polluants organiques persistants. Technical report, Le Programme international sur la sécurité des substances chimiques (PISSC), Mars 1996.
- [12] M. Choël, K. Deboudt, and P. Flament. Development of time-resolved description of aerosol properties at the particle scale during an episode of industrial pollution plume. *Water Air Soil Pollut.*, 209 :93–107, Sep. 2009.
- [13] J. C. Roger, M. Mallet, P. Dubuisson, H. Cachier, E. Vermote, O. Dubovik, and S. Despiiau. A synergetic approach for estimating the local direct aerosol forcing : Application to an urban zone during the Expérience sur Site pour CONtraindre les Modèles de Pollution et de Transport d'Émission (ESCOMPTE) experiment. *Journal of Geophysical Research*, 111, July 2006.

- [14] Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie. Les polluants surveillés dans l'air ambiant. <http://www2.ademe.fr>, Consulté le 19 Février 2013.
- [15] EUROPEAN COMMISSION. Reference document on best available techniques for mineral oil and gas refineries. Technical report, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Feb. 2003.
- [16] EUROPEAN COMMISSION. Best available techniques (bat) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide. Technical report, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Apr. 2013.
- [17] EUROPEAN COMMISSION. Reference document on the best available techniques for waste incineration. Technical report, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Aug. 2006.
- [18] F. Bonn and G. Rochon. *Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes*. Presses Universitaires du Québec, Montréal., 1992.
- [19] Erin M. O'Donnell, David W. Messinger, Carl Salvaggi, and John R. Schott. Identification and detection of gaseous effluents from hyperspectral imagery using invariant algorithms. In *Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery X*, volume 5425, Aug. 2004.
- [20] David W. Messinger. Gaseous plume detection in hyperspectral images : a comparison of methods. In *Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery X*, volume 5425, Aug. 2004.
- [21] Emmett J. Ientilucci and Scott D. Brown. Advances in wide area hyperspectral image simulation. In *Proceedings of SPIE, Targets and Backgrounds IX : Characterization and Representation*, volume 5075, 2003.
- [22] Caroline S. Turcotte and Michael R. Davenport. Gas plume quantification in downlooking hyperspectral longwave infrared images. In *Image and Signal Processing for Remote Sensing XVI*, volume 7830, 2010.
- [23] D. M. Sheen, N. B. Gallagher, P. G. Heasler, J. F. Schultz, B. M. Wise, S. W. Sharpe, and K. K. Anderson. Infrared chemical detection systems modeling and advanced chemometric analysis. *Pacific Northwest National Laboratory*, PNNL-13737, Dec. 2001.
- [24] Stephen Walsh, Larry Chilton, Mark Tardiff, and Candace Metoyer. Effect of the temperature-emissivity contrast on the chemical signal for gas plume detection using thermal image data. *Sensors*, 8 :6471–6483, Oct. 2008.
- [25] Sidi Niu, Steven E. Golowich, Vinay K. Ingle, and Dimitis G. Manolakis. New approach to remote gas-phase chemical quantification : selected-band algorithm. *Optical Engineering*, 53(2), Feb. 2014.
- [26] V. Masson, L. Gomes, G. Pigeon, C. Liousse, V. Pont, J.-P. Lagouarde, J. Voogt, J. Salmond, T. R. Oke, J. Hidalgo, D. Legain, O. Garrouste, C. Lac, O. Comnan, X. Briottet, S. Lachérade, and P. Tulet. The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOUL) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 2008.
- [27] James Adrian Voogt. *Thermal remote sensing of urban surface temperatures*. PhD thesis, the university of British Columbia, 1995.
- [28] A.M. Baldridge, S.J. Hook, C.I. Grove, and G. Rivera. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113 :711–715, 2009.
- [29] John P. Kerekes, Kristin-Elke Strackerjan, and Carl Salvaggio. Spectral reflectance and emissivity of man-made surfaces contaminated with environmental effects. *Optical Engineering*, 47 :106201–1 – 106201–10, 2008.
- [30] M. Mira, E. Valor, R. Boluda, V. Caselles, and C. Coll. Influence of the soil moisture effect on the thermal infrared emissivity. *Associacio Catalana de Meteorologia*, 4 :3–9, 2007.

-
- [31] Audrey Lesaignoux, Sophie Fabre, and Xavier Briottet. Influence of soil moisture content on spectral reflectance of bare soils in the 0.4–14 μm domain. *International Journal of Remote Sensing*, 34 :2268 – 2285, 2013.
 - [32] William J. Blackwell. A neural network technique for atmospheric compensation and temperature / emissivity separation using LWIR / MWIR hyperspectral data. In *Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery X*, volume 5425, pages 604 – 615, 2004.
 - [33] Joel Susskind, Christopher D. Barnet, and John M. Blaisdell. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 :390 – 409, 2003.
 - [34] R. Saunders, P. Rayner, P. Brunel, A. von Engeln, N. Bormann, L. Strow, S. Hannon, S. Heillette, Xu Liu, F. Miskolczi, Y. Han, G. Masiello, J.-L. Moncet, Gennady Uymin, V. Sherlock, and D. S. Turner. A comparison of radiative transfer models for simulating Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS) radiances. *Journal of geophysical research*, 112, 2007.
 - [35] G.I Taylor. Diffusion by continuous movements. In *Proceedings of the London Mathematical Society*, volume 20, pages 196–212, 1921.
 - [36] Florian VENDEL. *Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d’obstacles complexes : application à l’étude de sites industriels*. PhD thesis, L’ECOLE CENTRALE DE LYON et TOTAL, 2011.
 - [37] R. Perkins, L. Souhac, P. Mejean, and I. Rios. Modélisation de la dispersion des émissions atmosphériques d’un site industriel - vers un guide de l’utilisateur. Technical report, LMFA - École Centrale de Lyon, Sep. 2005.
 - [38] D.J. Carruthers, R.J. Holroyd, J.C.R. Hunt, W.S. Weng, A.G. Robins, D.J. Thomson, and F.B. Smith. UK-ADMS : a new approach to modelling dispersion in the earth’s atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 52 :139–153, 1994.
 - [39] Côme Daniau, Anne Thébaud, Laure Malherbe, Arnaud Mathieu, Frédéric Tognet, and Laurence Rouil. Comparaison de deux modèles gaussiens de dispersion atmosphérique : ADMS et ARIA Impact. Technical report, Institut de veille sanitaire, sep. 2010.
 - [40] Jacques Moussafir, Christophe Olry, Pierre Castanier, Gianni Tinarelli, and Sylvie Perdriel. Applications of the MSS (Micro-Swift-Spray) model to long-term regulatory simulations of the impact of industrial plants. In *13th Conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes*, 2010.
 - [41] Abdelkarim Habib, Bernd Schalau, and Dirk Schmidt. Comparing different methods for calculating the gas dispersion. *Chemical engineering transactions*, 31 :145–150, 2013.
 - [42] S. Dharmavaram, S.R. Hanna, and O. R. Hansen. Consequence analysis - using a CFD model for industrial sites. *Process Safety Progress*, 24 :316 – 327, 2005.
 - [43] CD Adapco Group. *User guide : STAR-CD Version 3.26*, 2005.
 - [44] ANSYS Inc. *ANSYS CFX reference guide*, Nov. 2009.
 - [45] Fluent Inc. *FLUENT 6.3 User’s Guide*, Sep. 2006.
 - [46] M.L. Barad. Project prairie grass, a field program in diffusion. *Geophysical Research Paper*, 59, 1958.
 - [47] S. Didi Kuo, John R. Schott, and Chia Y. Chang. Synthetic image generation of chemical plumes for hyperspectral applications. *Optical Engineering*, 39 :1047 – 1056, Apr. 2000.
 - [48] Paolo Zannetti. *Air pollution modeling : Theories, Computational methods and Available Software*, chapter Gaussian models, pages 141–165. Computational mechanics publications, 1990.
-

- [49] Steven W. Sharpe, Timothy J. Johnson, Robert L. Sams, Pamela M. Chu, George C. Rhoderick, and Patricia A. Johnson. Gas-phase databases for quantitative infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 58(12) :1452–1461, Nov. 2004.
- [50] Christophe Miesch, Laurent Poutier, Véronique Achard, Xavier Briottet, Xavier Lenot, and Yannick Boucher. Direct and inverse radiative transfer solutions for visible and near-infrared hyperspectral imagery. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 43 :1552 – 1561, 2005.
- [51] Chris D. Boone, Kaley A. Walker, and Peter F. Bernath. Version 3 retrievals for the atmospheric chemistry experiment fourier transform spectrometer (ace-fts). *The Atmospheric Chemistry Experiment ACE at 10 : A Solar Occultation Anthology*, 20, 2013.
- [52] U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. *U.S. Standard Atmosphere*, 1976.
- [53] Yann Ferrec, Sophie Thétas, Jérôme Primot, Christophe Coudrain, Philippe Perrault, Pierre Fournet, Sylvie Bernhardt, Marcel Caës, Michel Tauvy, Joël Deschamps, Didier Henry, Alain Kattinig, Patricia Cymbalista, and Laurent Rousset-Rouvière. Sieleters, an airborne imaging static fourier transform spectrometer : design and preliminary laboratory results. *Imaging and Applied Optics*, FM1D.3, Jun. 2013.
- [54] Martin Schlerf, Gilles Rock, Philippe Lagueux, Franz Ronellenfitsch, Max Gerhards, Lucien Hoffmann, and Thomas Udelhoven. A hyperspectral thermal infrared imaging instrument for natural resources applications. *Remote Sensing*, 4 :3995–4009, Dec. 2012.
- [55] Caravan International Corp. *AHS-160 Airborne Hyperspectral Scanner*. Available : [http ://www.caravan-ny.com/AHS-160_1Chassis.pdf](http://www.caravan-ny.com/AHS-160_1Chassis.pdf).
- [56] M. Y. PERRIN and J. M. HARTMANN. Temperature-dependent measurements and modeling of absorption by CO₂ – N₂ mixtures in the far line-wings of the 4.3 μm CO₂ band. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 42, 1989.
- [57] Keyvan KANANI. *Utilisation de la très haute résolution spectrale pour la mesure en environnement extérieur de l'émissivité de surface dans la bande infrarouge 3 – 13 μm - Méthodes et validation expérimentale*. PhD thesis, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2005.
- [58] Laurent CORET. *Impact de l'hétérogénéité de surface sur le signal en entrée d'un capteur infrarouge thermique. Prise en compte de l'aspect directionnel*. PhD thesis, École nationale supérieur de l'aéronautique et de l'espace, 2002.
- [59] Dimitris G. Manolakis, Steven E. Golowich, and Robert S. DiPietro. Long-Wave Infrared Hyperspectral remote sensing of chemical clouds. *IEEE Signal processing magazine*, 31 :120 – 141, Jul. 2014.
- [60] David J. Williams, Barry L. Feldman, Tim J. Williams, Drew Pilant, Paul G. Lucey, and L. Dorsey Worthy. Detection and identification of toxic air pollutants using airborne LWIR hyperspectral imaging. In *Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications II*, volume 5655, 2005.
- [61] Pierre V. Villeneuve, Herbert A. Fry, James Theiler, William B. Clodius, Barham W. Smith, and Alan D. Stocker. Improved matched-filter detection techniques. In *Proceedings of SPIE, Imaging Spectrometry V*, volume 3753, Jul. 1999.
- [62] Christopher C. Funk, James Theiler, Dar A. Roberts, and Christoph C. Borel. Clustering to improve matched filter detection of weak gas plumes in hyperspectral thermal imagery. In *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, volume 39, Jul. 2001.
- [63] Peter Bajorski, Emmett J. Ientilucci, and John R. Schott. Comparison of basis-vector selection methods for target and background subspaces as applied to subpixel target detection. In *Proceedings of SPIE, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery X*, volume 5425, 2004.

- [64] P. Lagueux, V. Farley, M. Rolland, and M. Chamberland. Airborne measurements in the infrared using FTIR-based imaging hyperspectral sensors. In *Proceedings of First Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing : Evolution in Remote Sensing, Grenoble, France*, page 482–485, Aug. 2009.
- [65] Augustin Ifarraguerri and Chein-I Chang. Unsupervised hyperspectral image analysis with projection pursuit. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 :2529 – 2538, 2000.
- [66] S.J. Young, B.R. Johnson, and J.A. Hackwell. An in-scene method for atmospheric compensation of thermal hyperspectral data. *Journal of Geophysical Research : Atmosphere*, 107, 2002.
- [67] D. Gu, A.R. Gillespie, A.B. Kahle, and F.D. Palluconi. Autonomous atmospheric compensation (AAC) of high resolution hyperspectral thermal infrared remote-sensing imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 :2557 – 2570, Nov. 2000.
- [68] François Becker and Zhao-Liang Li. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 32 :17–33, Apr. 1990.
- [69] Ken Watson. Two-temperature method for measuring emissivity. *Remote Sensing of Environment*, 42 :117–121, Jul. 1992.
- [70] Zhengming Wan and Zhao-Liang Li. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35 :980–996, Jul. 1997.
- [71] C.C. Borel. Surface emissivity and temperature retrieval for a hyperspectral sensor. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, volume 1, pages 546 – 549, Jul. 1998.
- [72] Neal B. Gallagher, Barry M. Wise, and David M. Sheen. Estimation of trace vapor concentration-pathlength in plumes for remote sensing applications from hyperspectral images. *Analytica Chimica Acta*, 490 :139 – 152, Jan. 2003.
- [73] S.J. Young. Detection and quantification of gases in industrial-stack plumes using thermal-infrared hyperspectral imaging. *the Aerospace Corporation*, report no. ATR-2002(8407)-1, feb. 2002.
- [74] A Hayden, E Niple, and B Boyce. Determination of trace-gas amounts in plumes by the use of orthogonal digital filtering of thermal-emission spectra. *Applied optics*, 35 :2802–2809, 1996.
- [75] Michael K. Griffin, John P. Kerekes, Kristine E. Farrar, and Hsiao hua K. Burke. Characterization of gaseous effluents from modeling of LWIR hyperspectral measurements. In *Proceedings of SPIE, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VII*, volume 4381, Aug. 2001.
- [76] Andreas Hayden and Robert Noll. Remote trace gas quantification using thermal IR spectroscopy and digital filtering based on principal components of background scene clutter. In *Algorithms for Multispectral and Hyperspectral Imagery III*, volume 3071, Aug. 1997.
- [77] R. Harig, G. Matz, and P. Rusch. Scanning infrared remote sensing system for identification, visualization, and quantification of airborne pollutants. In *Proceedings of SPIE, Instrumentation for Air Pollution and Global Atmospheric Monitoring*, volume 4574, 2002.
- [78] Pierre Tremblay, Simon Savary, Matthias Rolland, André Villemaire, Martin Chamberland, Vincent Farley, Louis Brault, Jean Giroux, Jean-Luc Allard, Éric Dupuis, and Tiarles Padia. Standoff gas identification and quantification from turbulent stack plumes with an imaging fourier-transform spectrometer. In *Proceedings of SPIE, Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies VII*, volume 7673, Apr. 2010.

- [79] Patrick Heasler, Christian Posse, Jeff Hylden, and Kevin Anderson. Nonlinear bayesian algorithms for gas plume detection and estimation from hyper-spectral thermal image data. *sensors*, 7 :905–920, Apr. 2007.
- [80] Christopher M. Gittins. Detection and characterization of chemical vapor fugitive emissions by nonlinear optimal estimation : theory and simulation. *Applied Optics*, 48 :905–920, Aug. 2009.
- [81] R. Idoughi, P-Y. Foucher, L. Poutier, and X. Briottet. Gaseous pollutants characterization over heterogeneous ground from airborne hyperspectral measurements at high spatial resolution : case of industrial sites. In *the 8th EARSEL SIG Imaging Spectroscopy workshop, Nantes, France*, Apr. 2013.
- [82] David M. Sheen, Neal B. Gallagher, Steven W. Sharpe, Kevin K. Anderson, and John F. Schultz. Impact of background and atmospheric variability on infrared hyperspectral chemical detection sensitivity. In *Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX*, volume 5093, 2003.
- [83] D. W. Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11 :431–441, 1963.
- [84] Neal B. Gallagher, Barry M. Wise, and David M. Sheen. Error analysis for estimation of trace vapor concentration pathlength in stack plumes. *Applied Spectroscopy*, 57 :614 – 621, Jan. 2003.
- [85] Gerard P. Jellison and David P. Miller. Validation and calibration of a spectroscopic technique for determination of gas plume temperature. In *Defense and Security*, pages 244 – 255. International Society for Optics and Photonics, 2004.
- [86] Sidi Niu, Steven E. Golowich, and Dimitis G. Manolakis. Algorithms for remote quantification of chemical plumes : A comparative study. In *Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII*, volume 8390, May 2012.
- [87] Maria Gabriela Orzanco. *Exploration de la fusion des informations pour améliorer la fiabilité locale d’une carte forestière*. PhD thesis, Université Laval, 2006.
- [88] Mark A. Friedl, Kenneth C. McGwire, and Douglas K. McIver. *An overview of uncertainty in optical remotely sensed data for ecological applications*, pages 258–283. Springer New York, 2001.
- [89] R. Idoughi, T. H. G. Vidal, P-Y. Foucher, M-A.Gagnon, and X. Briottet. Background radiance estimation for gas plume quantification in downlooking thermal infrared images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, page in preparation, 2015.
- [90] M. Fauvel, Y. Tarabalka, J. A. Benediktsson, J. Chanussot, and J.C Tilton. Advances in spectral-spatial classification of hyperspectral images. *Proceedings of the IEEE*, 101(3) :652–675, 2013.

Annexes

5.5 Annexe I : Résultats détaillés des classifications des scènes synthétiques

Dans cette section nous présentons les résultats détaillés des classifications des scènes synthétiques, réalisées dans le chapitre 4. Pour chacun des scénarii étudiés, nous illustrerons, tout d'abord, les représentations des pixels de la scène dans l'espace des trois premières composantes principales obtenues après une PCA (cf. figures de 5.27 à 5.34). Puis, nous exposerons l'ensemble des matrices de confusion des différentes classifications réalisées. En effet, dans le chapitre 4, nous n'avons illustré que les indices et coefficients (ICV, IPC et coefficient κ) tirés de ces matrices de confusion. Pour chacun des quatre scénarii étudiés, nous présentons la matrice de confusion des deux classifications (hors panache et sous le panache) d'abord en bande MWIR, puis en bande LWIR.

5.5.1 Scénario 1a (raffinerie)

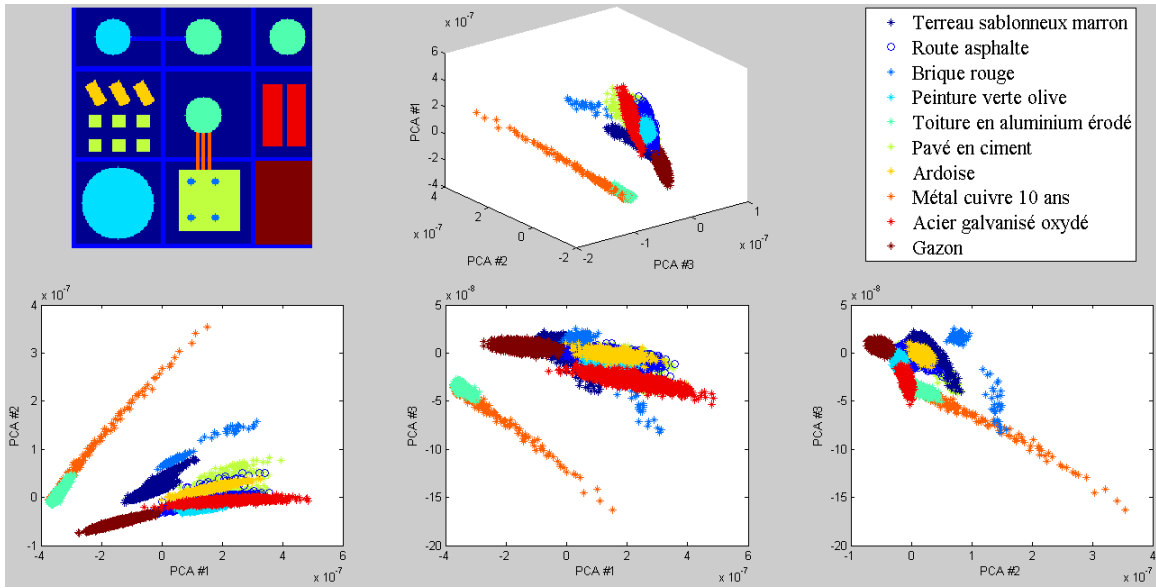


FIGURE 5.27 – Représentation des classes de l'image du scénario 1a en bande MWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

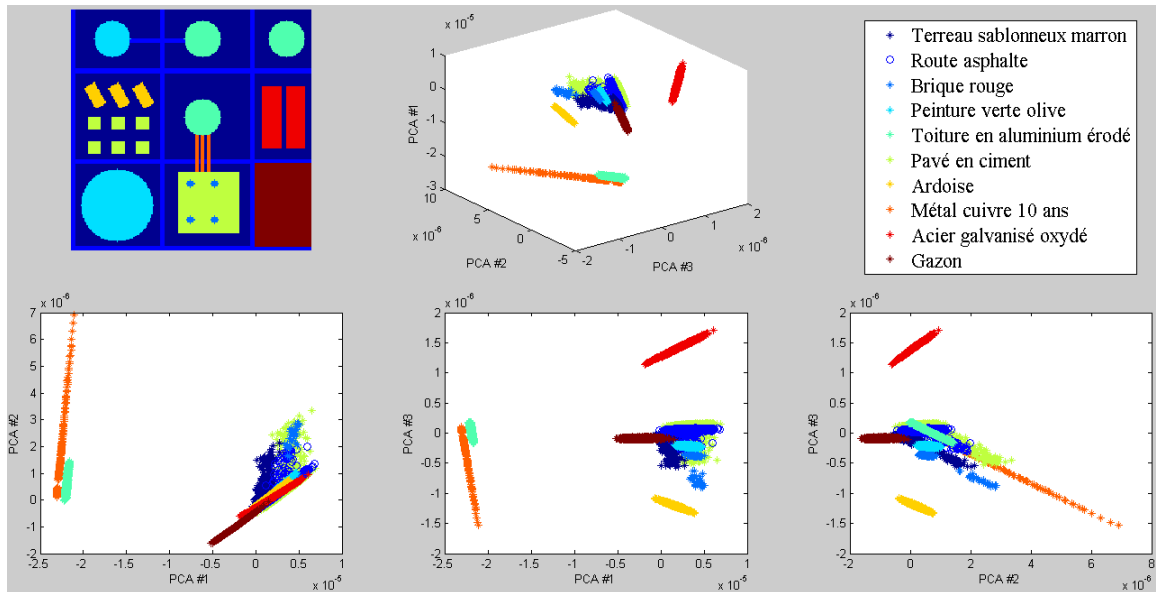


FIGURE 5.28 – Représentation des classes de l'image du scénario 1a en bande LWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

Matériau	Classes de la zone hors panache						ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	
Gazon	2982	306	0	0	0	2	90.64
Terreau sablonneux marron	4	20113	1	0	0	0	99.98
Peinture verte olive	0	1	3514	0	15	0	99.55
Route asphalte	0	168	3865	0	603	0	83.37
Brique rouge	0	73	14	0	0	0	83.91
Pavé en ciment	0	110	2495	0	383	0	83.50
Ardoise	0	13	500	0	90	0	82.92
Acier galvanisé oxydé	0	21	829	56	726	0	50.80
Métal cuivre 10 ans	0	0	0	0	0	94	100
Toiture en aluminium érodé	0	0	0	0	0	1727	100
IPC (%)	99.87	96.67	34.45	100	39.96	94.73	

Matériau	Classes de la zone du panache					ICV (%)
	1	2	3	4	5	
Terreau sablonneux marron	390	0	11	0	0	97.26
Route asphalte	4	0	52	0	0	92.86
Brique rouge	0	0	29	0	0	100
Pavé en ciment	9	0	214	0	0	95.96
Métal cuivre 10 ans	0	5	0	35	146	78.49
Toiture en aluminium érodé	0	0	0	0	400	100
IPC (%)	96.77	100	69.93	100	73.26	

TABLE 5.6: Matrices de confusion des classifications de la scène synthétique de raffinerie (scénario 1a) dans la bande MWIR.

Matériau	Classes de la zone hors panache					ICV (%)
	1	2	3	4	5	
Gazon	3149	141	0	0	0	95.71
Terreau sablonneux marron	3	15241	121	0	0	99.19
Peinture verte olive	0	15	3165	350	0	89.66
Route asphalte	0	410	2543	999	0	64.35
Brique rouge	0	0	51	36	0	58.62
Pavé en ciment	0	206	1695	891	0	60.71
Ardoise	0	380	220	3	0	63.02
Acier galvanisé oxydé	14	686	734	198	0	44.98
Toiture en aluminium érodé	0	0	0	0	709	100
IPC (%)	99.46	89.24	37.11	40.33	100	

Matériau	Classes de la zone du panache				ICV (%)
	1	2	3	4	
Terreau sablonneux marron	5145	9	0	0	99.83
Route asphalte	128	612	0	0	82.70
Brique rouge	0	29	0	0	100
Pavé en ciment	46	373	0	0	89.02
Métal cuivre 10 ans	0	0	60	220	78.57
Toiture en aluminium érodé	0	0	0	1418	100
IPC (%)	96.73	59.82	100	86.57	

TABLE 5.7: Matrices de confusion des classifications de la scène synthétique de raffinerie (scénario 1a) dans la bande LWIR.

5.5.2 Scénario 1b (raffinerie)

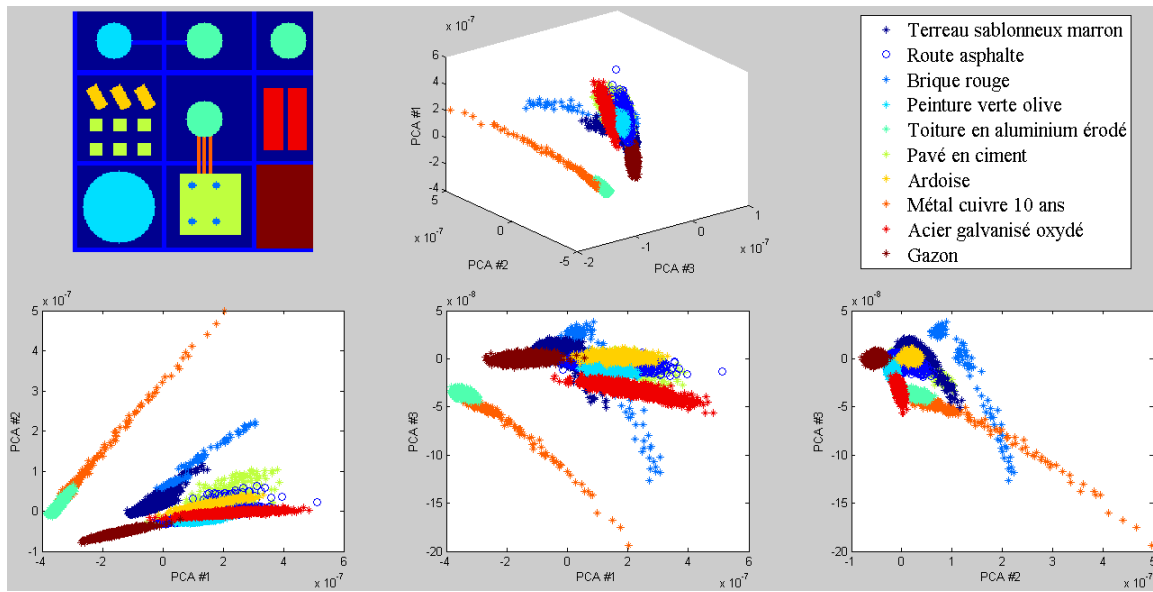


FIGURE 5.29 – Représentation des classes de l'image du scénario 1b en bande MWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

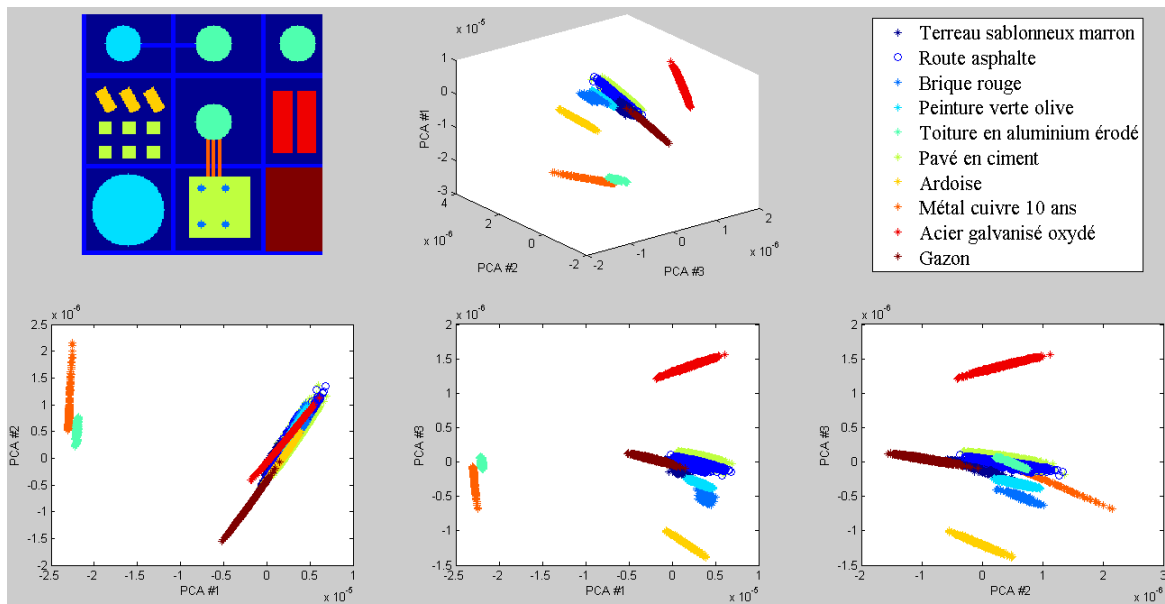


FIGURE 5.30 – Représentation des classes de l'image du scénario 1b en bande LWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

Matériau	Classes de la zone hors panache						ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	
Gazon	2990	299	1	0	0	0	90.88
Terreau sablonneux marron	12	19977	0	0	0	0	99.94
Route asphalte	0	171	3886	0	540	1	84.52
Brique rouge	0	50	8	0	0	0	86.21
Peinture verte olive	0	2	3520	0	8	0	99.72
Toiture en aluminium érodé	0	0	0	1571	0	0	100
Pavé en ciment	0	110	2496	0	325	0	85.16
Ardoise	0	18	483	0	102	0	80.10
Acier galvanisé oxydé	0	20	856	0	694	62	52.45
IPC (%)	99.60	96.75	34.54	100	41.58	98.41	

Matériau	Classes de la zone du panache						ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	
Terreau sablonneux marron	520	0	0	0	10	0	98.11
Route asphalte	12	0	0	0	82	0	87.23
Brique rouge	13	0	26	0	19	0	44.83
Toiture en aluminium érodé	0	0	0	556	0	0	100
Pavé en ciment	19	0	0	0	261	0	93.21
Métal cuivre 10 ans	0	12	0	229	0	39	81.79
IPC (%)	92.20	100	100	70.83	70.16	100	

TABLE 5.8: Matrices de confusion des classifications de la scène synthétique de raffinerie (scénario 1b) dans la bande MWIR.

Matériau	Classes de la zone hors panache							ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	
Gazon	1686	47	0	0	0	1557	0	51.25
Terreau sablonneux marron	50	15649	122	0	0	0	0	98.91
Peinture verte olive	0	15	3111	404	0	0	0	88.13
Route asphalte	0	437	2684	1135	0	0	20	62.77
Brique rouge	0	0	25	33	0	0	0	56.90
Toiture en aluminium érodé	0	0	0	0	709	0	0	100
Ardoise	5	376	219	3	0	0	0	62.35
Acier galvanisé oxydé	25	674	724	208	0	0	1	44.36
Pavé en ciment	0	192	1519	829	0	0	22	59.29
IPC (%)	95.47	89.99	37.02	43.45	100	100	51.16	

Matériau	Classes de la zone du panache						ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	
Terreau sablonneux marron	4629	0	69	0	0	0	98.53
Toiture en aluminium érodé	0	1418	0	0	0	0	100
Route asphalte	34	0	249	10	123	0	59.86
Brique rouge	0	0	21	0	37	0	63.79
Pavé en ciment	34	0	331	29	255	0	51
Métal cuivre 10 ans	0	0	0	0	0	280	100
IPC (%)	98.55	100	49.40	74.36	61.45	100	

TABLE 5.9: Matrices de confusion des classifications de la scène synthétique de raffinerie (scénario 1b) dans la bande LWIR.

5.5.3 Scénario 2a (cimenterie)

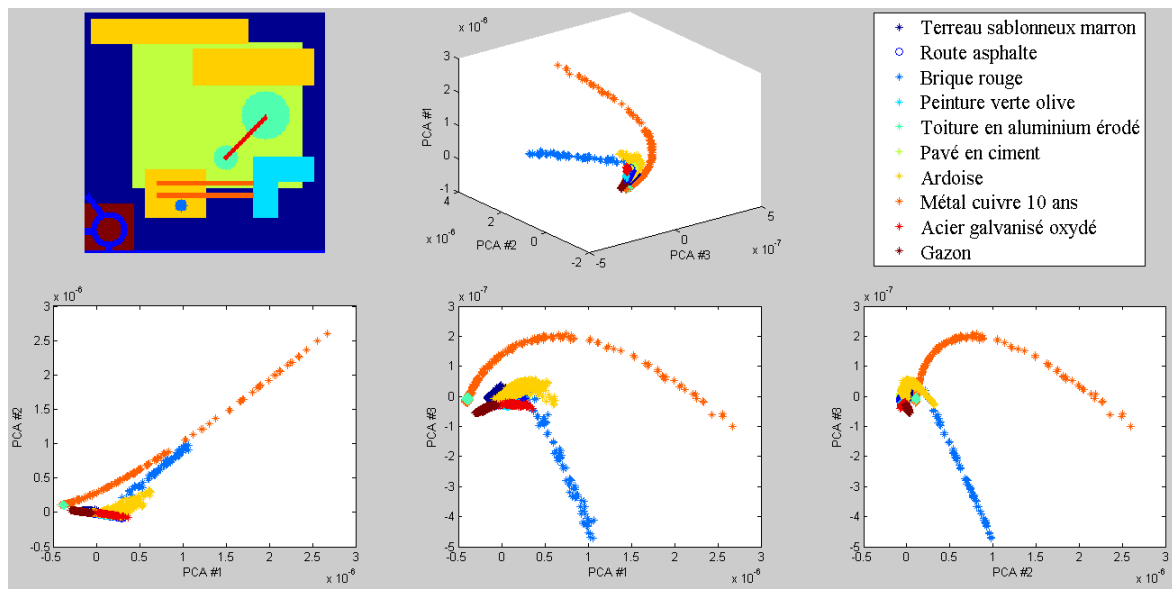


FIGURE 5.31 – Représentation des classes de l'image du scénario 2a en bande MWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

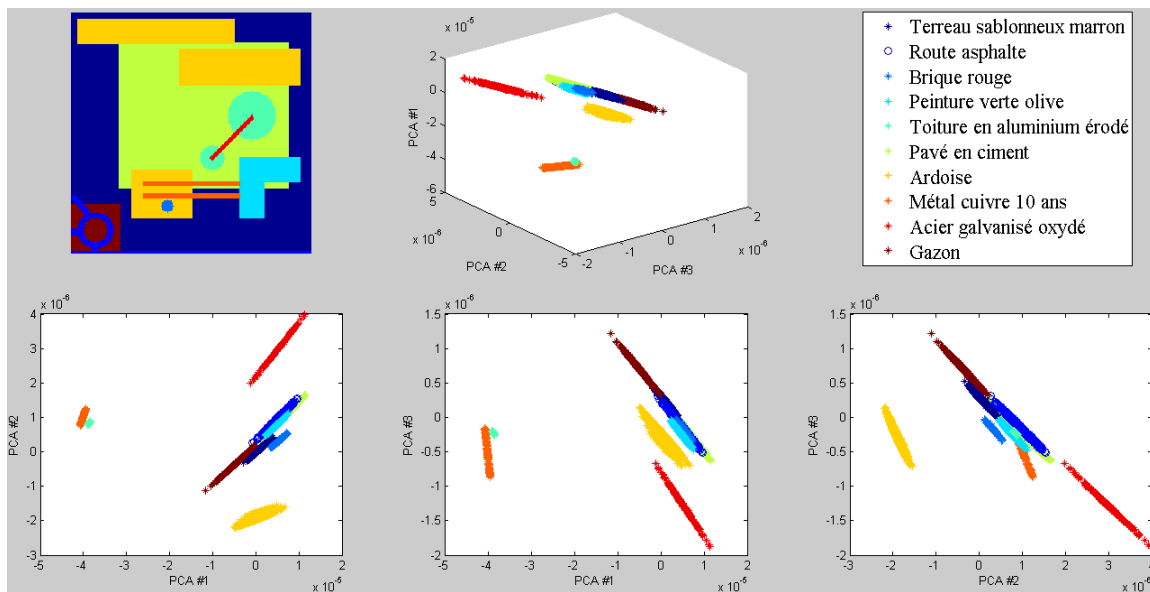


FIGURE 5.32 – Représentation des classes de l'image du scénario 2a en bande LWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

Matériau	Classes de la zone hors panache							ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	
Gazon	819	60	0	0	0	224	0	74.25
Terreau sablonneux marron	40	15697	2	0	0	0	0	99.73
Route asphalte	0	33	665	229	15	0	0	70.59
Peinture verte olive	0	0	1601	92	0	0	0	94.57
Pavé en ciment	0	257	6639	2674	175	0	0	68.13
Ardoise	0	120	4292	2375	140	0	0	61.96
Acier galvanisé oxydé	0	4	66	78	28	0	0	44.32
Métal cuivre 10 ans	0	0	0	0	0	0	416	100
Toiture en aluminium érodé	0	0	0	0	0	0	1460	100
IPC (%)	95.34	97.07	50.05	49.08	48.88	100	77.83	

Matériau	Classes de la zone du panache								ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8-13	
Pavé en ciment	825	0	0	0	0	0	0	0	100
Terreau sablonneux marron	22	0	2	0	0	0	0	0	91.67
Brique rouge	0	8	0	42	31	0	0	0	51.85
Ardoise	525	109	0	0	3	0	0	0	82.42
Métal cuivre 10 ans	0	0	103	0	0	42	35	52	44.40
IPC (%)	60.13	93.16	98.10	100	91.18	100	100	100	

TABLE 5.10: Matrices de confusion des classifications de la scène synthétique de cimenterie (scénario 2a) dans la bande MWIR.

Matériau	Classes de la zone hors panache									ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Gazon	834	9	0	0	0	0	60	200	0	75.61
Terreau sablonneux	1	14284	0	829	0	0	430	0	0	91.89
Route asphalte	0	30	203	286	414	9	0	0	0	43.95
Peinture verte olive	0	0	42	552	1099	0	0	0	0	64.91
Pavé en ciment	0	123	1785	1489	2920	241	0	0	0	44.53
Acier galvanisé oxydé	0	9	40	46	64	17	0	0	0	36.36
Ardoise	46	1082	1	446	6	0	3358	0	0	67.99
Métal cuivre 10 ans	0	0	0	0	0	0	0	0	358	100
Toiture en aluminium	0	0	0	0	0	0	0	0	1460	100
IPC (%)	94.67	91.94	86.19	40.82	64.85	90.26	87.27	100	80.31	

Matériau	Classes de la zone du panache					ICV (%)
	1	2	3	4	5	
Terreau sablonneux marron	31	0	6	182	0	83.11
Brique rouge	0	24	57	0	0	70.37
Pavé en ciment	0	1735	2181	96	0	54.36
Ardoise	963	1	44	1617	0	61.60
Métal cuivre 10 ans	0	0	0	0	290	100
IPC (%)	96.88	98.58	95.32	85.33	100	

TABLE 5.11: Matrices de confusion des classifications de la scène synthétique de cimenterie (scénario 2a) dans la bande LWIR.

5.5.4 Scénario 2b (cimenterie)

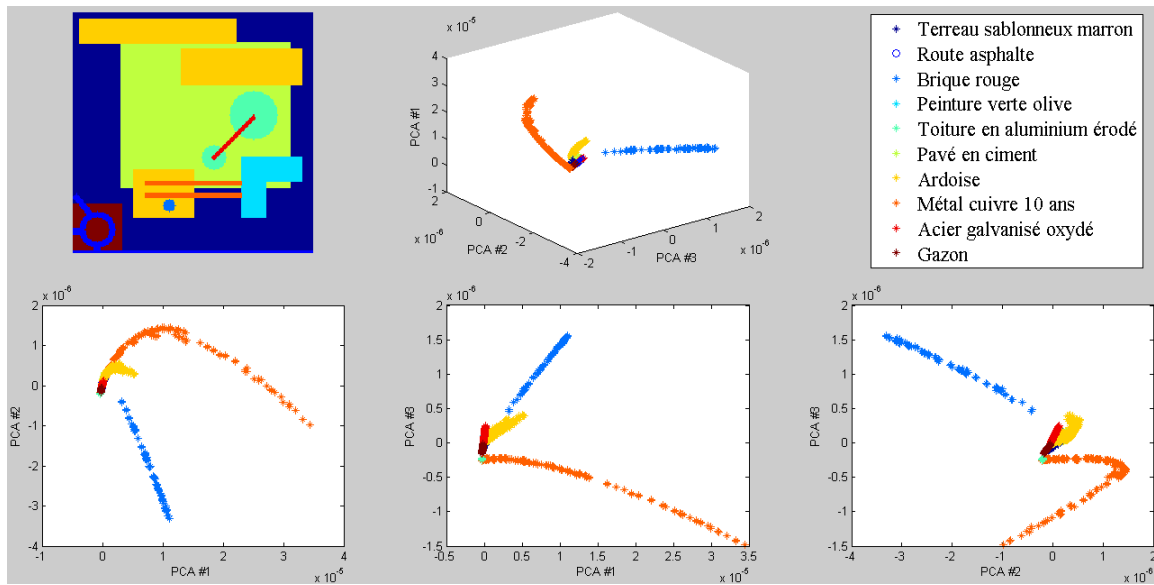


FIGURE 5.33 – Représentation des classes de l'image du scénario 2b en bande MWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

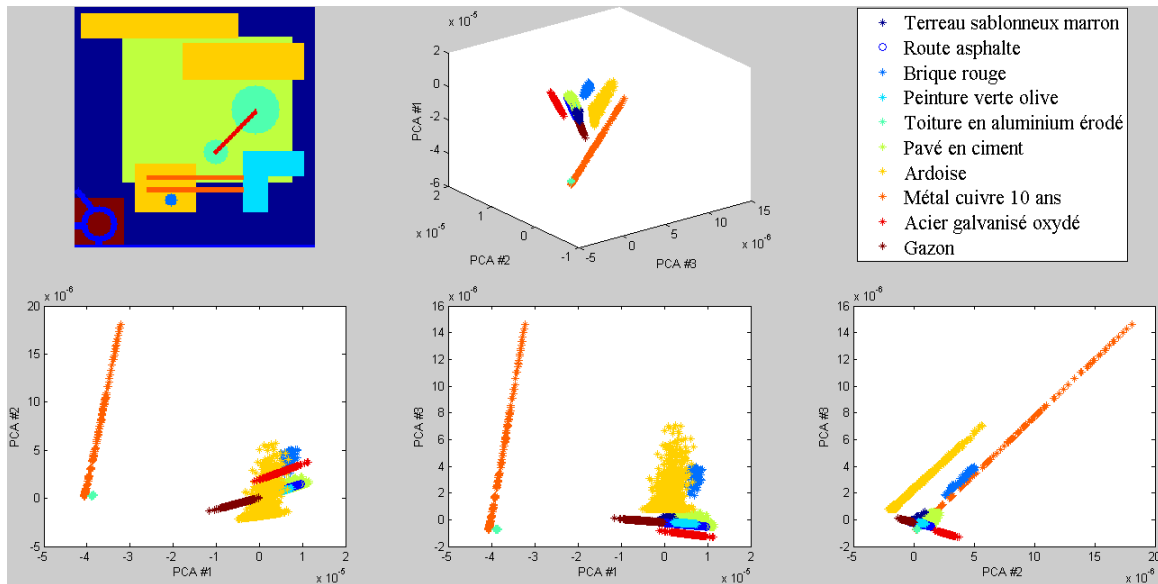


FIGURE 5.34 – Représentation des classes de l'image du scénario 2b en bande LWIR. Chaque pixel est représenté par un point dans l'espace des trois composantes principales obtenu après une PCA.

Matériau	Classes de la zone hors panache								ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Gazon	806	58	0	239	0	0	0	0	73.07
Terreau sablonneux	46	15157	0	0	2	0	0	0	99.68
Route asphalte	0	29	0	0	644	249	20	0	68.37
Peinture verte olive	0	0	0	0	1576	117	0	0	93.09
Pavé en ciment	0	124	1	0	3354	1447	109	0	66.61
Ardoise	0	67	0	0	2357	1420	96	0	59.82
Acier galvanisé oxydé	0	4	3	0	64	74	31	0	42.05
Métal cuivre 10 ans	0	0	0	0	0	0	0	297	100
Toiture en aluminium	0	0	0	0	0	0	0	1376	100
IPC (%)	94.6	98.17	75.00	100	41.94	43.76	42.58	82.25	

Matériau	Classes de la zone du panache							ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	
Terreau sablonneux	0	0	558	0	0	0	0	100
Brique rouge	0	59	0	22	0	0	0	72.84
Pavé en ciment	0	0	5535	0	0	0	0	100
Ardoise	0	0	3561	63	0	0	0	98.26
Métal cuivre 10 ans	14	0	223	42	47	14	11	63.53
Toiture en aluminium	0	0	84	0	0	0	0	100
IPC (%)	100	100	55.57	49.61	100	100	100	

TABLE 5.12: Matrices de confusion des classifications de la scène synthétique de cimenterie (scénario 2b) dans la bande MWIR.

Matériau	Classes de la zone hors panache									ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Gazon	830	5	0	0	0	70	0	198	0	75.25
Terreau sablonneux	1	14047	821	0	0	606	0	0	0	90.77
Route asphalte	0	31	289	207	406	0	9	0	0	43.10
Peinture verte olive	0	0	553	44	1096	0	0	0	0	64.74
Pavé en ciment	0	108	1304	1615	2566	0	212	0	0	44.20
Ardoise	41	983	383	1	5	2738	0	0	0	65.96
Acier galvanisé oxydé	0	9	47	40	63	0	17	0	0	35.80
Métal cuivre 10 ans	0	0	0	0	0	0	0	0	326	100
Toiture en aluminium	0	0	0	0	0	0	0	0	1460	100
IPC (%)	95.18	92.52	38.39	84.69	62.04	80.20	89.08	100	81.75	

Matériau	Classes de la zone du panache								ICV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Pavé en ciment	2940	0	1717	108	0	0	0	0	61.70
Terreau sablonneux marron	10	0	0	278	0	0	0	0	96.53
Brique rouge	2	0	46	0	0	33	0	0	56.79
Ardoise	76	0	1	3083	0	253	0	0	90.33
Métal cuivre 10 ans	0	32	0	0	170	0	60	60	52.80
IPC (%)	97.09	100	97.34	88.87	100	88.46	100	100	

TABLE 5.13: Matrices de confusion des classifications de la scène synthétique de cimenterie (scénario 2b) dans la bande LWIR.

Résumé

Les émissions atmosphériques constitue un enjeu majeur pour la société, à la fois pour les problématiques santé – qualité de l’air (maladies respiratoires, allergies,...) et pour les problématiques liées au réchauffement climatique et aux gaz à effet de serre. Les sources anthropiques, industrielles en particulier, émettent dans l’atmosphère gaz et aérosols qui jouent un rôle important dans les échanges atmosphériques. Néanmoins leur suivi à haute résolution spatiale reste peu précis, en raison des résolutions rencontrées pour les senseurs spatiaux. Les développements techniques récents des capteurs hyperspectraux aéroportés permettent d’améliorer la caractérisation des panaches.

Lors de nos travaux nous avons développé un nouvel outil pour la détection et la caractérisation des panaches de gaz. Ainsi, une cartographie 3D des différentes concentrations est obtenue. Cet outil est ensuite validé sur des images synthétiques et sur des acquisitions aéroportés de scènes industrielles.

Mot clés : Imagerie hyperspectrale, Spectroscopie infrarouge, Panache de gaz, Régression non-linéaire, Détection, Caractérisation, Classification.

Abstract

The air pollution is a very important issue for industrialized society, both in terms of health (respiratory diseases, allergies,...) and in terms of climate change (global warming and greenhouse gas emissions). Anthropogenic sources, especially industrial, emit into the atmosphere gases and aerosols, which play an important role in atmospheric exchanges. However emissions remain poorly estimated as most of existing space sensors have a limited spectral range as well as a too low spatial resolution. The use of the new hyperspectral airborne image sensors in the infrared range opens the way to new development to improve the plume characterization.

In our work, we developed a new method for detecting and characterizing gas plumes. It is based on an accurate non linear formalism of cloud gas radiative impact. This method was validated using synthetic scenes of industrial area, and airborne acquisitions obtained by a hyperspectral thermal infrared sensor.

Keywords : Hyperspectral imagery, Infrared spectroscopy, Gaseous plume, Non-linear regression, Detection, Characterization, Classification.
